

DÉPARTEMENT DE GÉOMATIQUE APPLIQUÉE

Faculté des lettres et sciences humaines

Université de Sherbrooke

Cartographie de la qualité de l'habitat pour le caribou boréal dans la région de Jean Marie River  
(Territoires du Nord-Ouest)

Par

Alexandra Lavoie

Essai présenté dans le cadre de l'activité GAE724 : Essai en géomatique appliquée

Maîtrise en sciences géographiques

Cheminement de type cours en géodéveloppement durable

Sherbrooke

Février 2019

## **Identification du jury**

### **Directeurs de l'essai :**

M. Jérôme Théau, Professeur agrégé, Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Sherbrooke

M. Fabrice Calmels, Chercheur associé, Yukon Research Centre, Yukon College

### **Évaluateur externe :**

M. Yacine Bouroubi, Professeur adjoint, Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Sherbrooke

## Sommaire

Lavoie, A. (2019). Cartographie de la qualité de l'habitat pour le caribou boréal dans la région de Jean Marie River (Territoires du Nord-Ouest). Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 87 p.

Les communautés nordiques, telle la communauté de Jean Marie River dans les Territoires du Nord-Ouest, sont vulnérables face à l'influence des changements climatiques sur les écosystèmes, car leur mode de vie est en étroite relation avec l'environnement. Un des enjeux importants pour la communauté est de pouvoir conserver leur sécurité alimentaire qui est liée à l'accessibilité et à la disponibilité des aliments issus de la flore et de la faune sauvage composant leur diète traditionnelle. La population du caribou boréal, inscrite comme « espèce menacée » selon la *Loi sur les espèces en péril*, n'est pas une source primaire traditionnelle de nourriture pour la communauté, mais elle est perçue comme ayant une valeur nutritionnelle, culturelle et écologique élevée. Dans le cadre de cet essai, un indice de qualité de l'habitat (IQH) a été adapté au territoire de la communauté afin d'évaluer la qualité de l'habitat du caribou boréal. Puisque la population est très sensible aux modifications de son territoire, l'évolution du couvert végétal de la région a aussi été analysée à partir de la comparaison de classification d'images satellitaires Landsat 5-TM et Landsat 8-OLI. Les résultats de la comparaison spatiotemporelle montrent une transition importante de la classe *Conifère* vers la classe *Sol nu/feu* (9,5 %) et de la classe *Tourbière avec arbustes* à la classe *Tourbière avec mousse* (28,64 %). La classe *Mixte* est celle ayant perdu le plus grand pourcentage de sa superficie (40,29 %), mais de façon égale entre les autres classes. Ces observations ont permis d'émettre plusieurs hypothèses liées aux variations climatiques ainsi qu'aux effets du dégel du pergélisol. Les résultats de l'IQH ont permis d'observer une fragmentation du territoire dans la qualité potentielle de l'habitat, liée au passage de la route de Mackenzie et de la route menant vers la communauté. Suite à l'essai, il est recommandé de poursuivre la surveillance de l'évolution du couvert végétal, surtout en ce qui a trait aux conséquences du dégel du pergélisol ainsi que de valider l'IQH avant de l'utiliser comme outil de gestion ou d'analyse de l'évolution de l'habitat du caribou boréal.

## TABLE DES MATIÈRES

Liste des figures .....	iv
Liste des tableaux.....	vi
Remerciements.....	viii
1 Mise en contexte et problématique .....	1
2 Objectifs.....	4
3 Cadre théorique.....	4
3.1 Caribou boréal.....	4
3.1.1 Description générale du caribou boréal .....	5
3.1.2 Habitat du caribou boréal.....	7
3.1.3 Menaces pour l'espèce.....	9
3.2 Communauté de Jean Marie River .....	11
3.2.1 Bref historique de la communauté .....	12
3.2.2 Aliments issus de la flore et de la faune sauvage.....	13
3.2.3 Préoccupations face aux changements climatiques .....	14
3.3 Indice de qualité de l'habitat .....	15
3.3.1 Description générale .....	16
3.3.2 Application de l'IQH pour l'étude du caribou.....	17
4 Données et méthodes .....	18
4.1 Site d'étude.....	18
4.2 Données.....	21
4.2.1 Données pour la classification .....	21
4.2.2 Données pour l'indice de qualité de l'habitat .....	22
4.3 Classifications .....	23
4.3.1 Sélection et définition des classes.....	24



4.3.2	Prétraitements .....	26
4.3.3	Familiarisation avec les classes d'intérêt sur l'imagerie satellitaire .....	26
4.3.4	Sélection des sites d'entraînement et de validation .....	28
4.3.5	Classification de l'image Landsat 8-OLI de 2017 .....	29
4.3.6	Re-classification de l'image Landsat 5-TM de 2011 .....	29
4.3.7	Comparaison temporelle .....	29
4.4	Indice de qualité de l'habitat .....	30
4.4.1	Choix de l'indice .....	30
4.4.2	Présentation de l'IQH .....	31
4.4.3	Application de l'IQH .....	33
5	Résultats .....	37
5.1	Cartographie de la végétation de la zone étudiée .....	37
5.1.1	Cartographie de la végétation pour l'année 2011 .....	38
5.1.2	Cartographie de la végétation pour l'année 2017 .....	41
5.2	Analyse spatiotemporelle de la végétation de la zone étudiée .....	44
5.2.1	Cartographie de l'évolution de la classe <i>Conifère</i> .....	45
5.2.2	Cartographie de l'évolution de la classe <i>Mixte</i> .....	49
5.2.3	Cartographie de l'évolution de la classe <i>Tourbière avec mousse</i> .....	52
5.2.4	Cartographie de l'évolution de la classe <i>Tourbière avec arbuste</i> .....	56
5.3	Cartographie de l'indice de qualité de l'habitat du caribou boréal pour la zone étudiée .....	60
6	Discussion des résultats .....	67
6.1	Comparaison et analyse de l'évolution du couvert végétal de la région étudiée entre 2011 et 2017 .....	67
6.2	Évaluation de la qualité de l'habitat du caribou boréal dans la région de Jean Marie River .....	71

6.3	Limites de l'essai.....	72
6.3.1	Classifications .....	72
6.3.2	Application de l'IQH .....	74
6.4	Recommandations .....	76
7	Conclusion .....	77
	Références .....	82

## LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 Photographie d'un caribou boréal (Conference of Management Authorities, 2017).....	5
Figure 3.2 Distribution du caribou boréal sur le territoire canadien (Environment Canada, 2008).....	6
Figure 3.3 Distribution du caribou boréal dans les Territoires du Nord-Ouest (Species at Risk Committee, 2012).....	7
Figure 3.4 Emblème de la communauté de Jean Marie River (Jean Marie First Nation, s.d.) .....	12
Figure 4.1 Cartographie des différentes zones d'études.....	19
Figure 4.2 Organigramme méthodologique général de l'essai.....	20
Figure 4.3 Résumé des étapes effectuées pour la classification de 2017.....	23
Figure 4.4 Cartographie des feux de forêt entre 2011 et 2017.....	25
Figure 4.5 Méthodologie pour l'application de l'IQH (Inspirée de Leblond et al.,2014b) .....	34
Figure 5.1 Carte de la classification de l'année 2011 .....	39
Figure 5.2 Carte de la classification pour l'année 2017 .....	42
Figure 5.3 Classes de 2017 occupées par la classe Conifère de 2011 (Seul le territoire classifié comme Conifère en 2011 est cartographié).....	46
Figure 5.4 Zones d'intérêt pour l'analyse spatiotemporelle de la classe Conifère .....	48
Figure 5.5 Classes de 2017 occupées par la classe Mixte de 2011 (Seul le territoire classifié comme Mixte en 2011 est cartographié) .....	50
Figure 5.6 Zones d'intérêt pour l'analyse spatiotemporelle de la classe Mixte.....	51
Figure 5.7 Classes de 2017 occupées par la classe Tourbière avec mousse de 2011 (Seul le territoire classifié comme Tourbière avec mousse en 2011 est cartographié) .....	53
Figure 5.8 Zones d'intérêt pour l'analyse spatiotemporelle de la classe Tourbière avec mousse .....	55
Figure 5.9 Effet de la présence d'un nuage non masqué sur une image de la classification .....	56

Figure 5.10 Classes de 2017 occupées par la classe Tourbière avec arbuste de 2011 (Seul le territoire classifié comme Tourbière avec arbuste en 2011 est cartographié).....	57
Figure 5.11 Zones d'intérêt pour l'analyse spatiotemporelle de la classe Tourbière avec arbuste .....	59
Figure 5.12 Cartographie du modèle de qualité d'habitat pour le caribou boréal sur le territoire de Jean Marie River.....	61
Figure 5.13 Cartographie de la comparaison entre l'emplacement des infrastructures humaines et l'IQH .....	62
Figure 5.14 Cartographie de la comparaison des variables d'habitat Conifère et Milieux humides avec l'IQH .....	64
Figure 5.15 Cartographie de la comparaison des variables d'habitat Bandes défrichées, Milieux en régénération et Perturbations naturelles $\leq 20$ ans avec l'IQH .....	65
Figure 5.16 Zones avec une faible qualité potentielle d'habitat caractérisées par une présence importante de forêt mixte .....	66

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Menaces pour le caribou (Inspiré de Mallory and Boyce, 2018; Conference of Management Authorities, 2017) .....	9
Tableau 4.1 Données utilisées pour la classification (Calmels et al., 2014; ESA, 2018a; Ressources naturelles Canada, 2017a; Ressources naturelles Canada, 2017b; U.S. Department of the Interior, 2018a).....	21
Tableau 4.2 Données vectorielles utilisées pour l'IQH (Ressources naturelles Canada, 2017a; Ressources naturelles Canada, 2017b; Northwest Territories Centre for Geomatics, 2018) .....	22
Tableau 4.3 Description des couleurs perçues pour les différentes classes selon le composé coloré et le type d'image satellite (modifié de Calmels et al., 2014b; Peters, 2015).....	27
Tableau 4.4 Comparaison entre les bandes utilisées de Landsat 5-TM, Landsat 8-OLI et Sentinel 2-MSI S2A (U.S. Department of the Interior, 2018b; ESA, 2018b).....	28
Tableau 4.5 Nombre de sites et de pixels pour les zones d'entraînement et de validation pour la classification de 2011 et la classification de 2017 .....	29
Tableau 4.6 Valeurs attribuées aux pixels des couches matricielles selon l'année de la classification et la classe.....	30
Tableau 4.7 Manipulations effectuées pour les prétraitements nécessaires pour les variables d'habitat .....	35
Tableau 5.1 Rapport de séparabilité pour les zones d'entraînement et de validation utilisées pour la classification de 2011 et de 2017 .....	38
Tableau 5.2 Superficie occupée par chacune des classes pour la classification de 2011 .....	40
Tableau 5.3 Matrice de confusion pour la classification de 2011.....	40
Tableau 5.4 Superficie occupée par chacune des classes pour la classification de 2017 .....	43
Tableau 5.5 Matrice de confusion pour la classification de 2017.....	44

Tableau 5.6 Comparaison spatiotemporelle de la superficie (km <sup>2</sup> ) entre les classes de 2011 et 2017 .....	44
Tableau 5.7 Superficie du territoire occupé par les classes de 2017 issues de la classe Conifère de 2011 .....	45
Tableau 5.8 Superficie du territoire occupé par les classes de 2017 issues de la classe Mixte de 2011 .....	49
Tableau 5.9 Superficie du territoire occupé par les classes de 2017 issues de la classe Tourbière avec mousse de 2011 .....	54
Tableau 5.10 Superficie du territoire occupé par les classes de 2017 issues de la classe Tourbière avec arbuste de 2011 .....	58
Tableau 5.11 Superficie du territoire occupé par chacune des catégories de valeurs de qualité d'habitat potentiel.....	60

## REMERCIEMENTS

J'aimerais adresser mes remerciements et ma reconnaissance aux personnes ayant contribué à la réalisation de l'essai.

Tout d'abord, je tiens à remercier sincèrement mes directeurs de recherche. Jérôme Théau qui, grâce à son support et ses nombreux conseils, m'a encouragé à persévérer et à mettre toute l'énergie nécessaire pour la complétion de l'essai. Fabrice Calmels pour son expertise et pour ses diverses connaissances qui ont permis d'apporter des améliorations à l'essai.

Je tiens aussi à remercier Cyrielle Laurent (Spécialiste en SIG au Northern Climate ExChange, Yukon Research Centre) pour sa rapidité à fournir l'information nécessaire pour la complétion de l'essai ainsi que pour sa disponibilité. Ainsi que Mathieu Leblond (Chercheur scientifique, Direction générale des sciences et de la technologie, Environnement et Changement climatique Canada, Gouvernement du Canada) pour sa patience et ses nombreux courriels afin de répondre à mes nombreuses questions portant sur l'application de l'IQH.

Finalement, je remercie mon conjoint pour le support qu'il m'a apporté tout au long de mon périple.

## 1 MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

L'influence des changements climatiques sur les écosystèmes est une préoccupation grandissante. Depuis les années 1950, une tendance au réchauffement du climat est observée. Cette tendance est attribuée principalement à une augmentation de l'émission de gaz à effet de serre issus des activités anthropiques générées depuis l'avènement de l'ère industrielle (*circa* 1850). Les impacts des changements climatiques sur les écosystèmes sont de plus en plus importants, surtout dans les régions plus sensibles aux modifications climatiques comme l'Arctique (ACIA, 2004 ; IPCC, 2014). Dans les dernières décennies, on a observé une augmentation de la température atmosphérique presque deux fois plus élevée dans cette région que dans le reste du monde (ACIA, 2004 ; AMAP, 2012). En moyenne, la température annuelle moyenne mesurée est d'au moins 1.5 °C de plus que la moyenne enregistrée pour la période de 1961 à 1990. Les changements notés ne sont pas uniformes et varient selon la zone ou la période de l'année. Par exemple, de 2000 à 2011, il a été observé dans l'océan Arctique une température moyenne saisonnière supérieure de 4 °C aux moyennes saisonnières mesurées pour la période de 1951 à 2000 (AMAP, 2012). Ces variations entraînent la modification de l'environnement ainsi qu'un déséquilibre météorologique (ACIA, 2004).

Les communautés nordiques occupant la région de l'Arctique sont vulnérables face à ces modifications puisque leur mode de vie est souvent adapté et dépendant de leur environnement (ACIA, 2004). La communauté de Jean Marie River, traditionnellement appelée *Tthets'éhk'e Délî got'ine* (Jean Marie First Nation and PACTeam Canada, 2011), est une des communautés concernées par ces modifications. Le territoire occupé par celle-ci se situe dans les Territoires du Nord-Ouest, dans la région administrative de Dehcho, à environ 127 kilomètres au sud-est de Fort Simpson (JeanMarie First Nation and PACTeam Canada, 2011). La communauté est composée d'une population totale inscrite de 136 individus en 2013 (Gouvernement du Canada, 2013), toutefois, selon le recensement de 2016, seulement 77 personnes y habitent (Statistique Canada, 2017). La communauté a rapidement pris conscience de l'importance de mieux comprendre les changements à venir afin d'être prêt à s'adapter. Elle a entrepris en 2012, en collaboration avec plusieurs partenaires, l'étude des impacts pouvant être engendrés par le dégel du



pergélisol suite aux changements climatiques. La combinaison des connaissances traditionnelles et du savoir scientifique a permis de cartographier la vulnérabilité du pergélisol de la région et la végétation ainsi que de cibler les enjeux pour la pérennité de la communauté (Brown et al., 2013; Calmels et al., 2014a).

Un de ces enjeux concerne l'état de la sécurité alimentaire de la communauté. Les membres de Jean Marie River dépendent encore beaucoup de l'environnement pour les aliments issus de la flore et de la faune sauvage qui composent leur diète traditionnelle. L'acquisition de produits alimentaires commerciaux nécessite un déplacement vers Fort Simpson ou Hay River situés à environ 127 km et 360 km respectivement de la communauté, car il n'y a pas de magasins d'alimentation à Jean Marie River. Il est donc important pour la communauté de comprendre la modification de leur territoire afin de continuer les activités permettant l'acquisition des aliments pour leur diète traditionnelle, comme la chasse, la pêche et la cueillette. (Brown et al., 2013)

Un des animaux faisant partie de la diète traditionnelle est le caribou des bois, *Rangifer tarandus Caribou* (Dehcho First Nations, 2011). Cette sous-espèce est classifiée en plusieurs populations selon différents critères (COSEPAC, 2011). Dans la région du Dehcho, on retrouve la population du caribou boréal (Dehcho First Nations, 2011) qui est inscrite comme « espèce menacée » selon la *Loi sur les espèces en péril* (Gouvernement du Canada, 2018). Malgré le fait que cet animal n'est pas considéré comme une source primaire traditionnelle de nourriture dans la communauté de Jean Marie River, il est évalué comme ayant une valeur nutritionnelle, culturelle et écologique élevée par celle-ci (Dehcho First Nations, 2011; Bull, 2017). Selon les observations de la communauté, une diminution du nombre d'individus a été notée (Species at Risk Committee, 2012; Dehcho First Nations, 2011). Dans les dernières années, des groupes de 2 à 3 caribous sont plus communs, mais il arrive encore d'observer des groupes plus nombreux (5 à 7 caribous) allant jusqu'à 15 têtes vers la fin de l'hiver. La modification de l'habitat du caribou liée aux changements climatiques pourrait être une cause de cette variation (Dehcho First Nations, 2011).

Dans le but de contribuer au maintien et à l'amélioration de la sécurité alimentaire de la communauté de Jean Marie River, il est important de développer une meilleure

connaissance de l'habitat de la population du caribou boréal. Depuis plusieurs années, une stratégie de rétablissement pour le caribou boréal dans les Territoires du Nord-Ouest est en place afin de rétablir une population viable. Un des objectifs de cette stratégie est d'assurer l'existence des habitats convenant aux besoins de l'espèce dans les Territoires du Nord-Ouest (Conference of Management Authorities, 2017). Le choix de cet objectif pour la stratégie de rétablissement démontre l'importance de développer une meilleure connaissance du territoire en lien avec les besoins de l'animal. Cela permet d'évaluer le territoire selon des critères spécifiques qui peuvent aider à cerner les variations dans la qualité de l'habitat pour le caribou boréal. Suivre ces variations facilite la mise en place d'actions de prévention ou d'adaptation.

Afin d'analyser un territoire pour une espèce, un indice de qualité de l'habitat (IQH) peut être utilisé. Un IQH est composé de différents critères liés aux éléments biologiques et physiques pouvant influencer la survie et la reproduction de l'espèce ciblée (Gouvernement du Québec, 2016). Cela nécessite l'acquisition et l'utilisation de diverses informations sur la zone étudiée en lien avec les critères de l'IQH. Lorsque le territoire est éloigné et difficile d'accès, comme celui de la communauté de Jean Marie River, il peut être coûteux et ardu d'obtenir des données *in situ*.

L'utilisation de la télédétection offre une méthodologie relativement peu coûteuse et efficace pour étudier un territoire difficile d'accès. Il est possible de suivre l'évolution dans le temps et l'espace de phénomènes puisqu'il y a une bonne couverture spatiale et temporelle effectuée par diverses missions satellitaires et aériennes. L'utilisation de la télédétection pour effectuer l'évaluation de la qualité de l'habitat pour le caribou boréal permettrait de fournir des outils à la communauté de Jean Marie River afin de mieux comprendre les changements liés à la diminution du nombre d'individus observés dans les dernières années.

## 2 OBJECTIFS

L'objectif général :

- Évaluer la qualité de l'habitat du caribou boréal dans la région de Jean Marie River (Territoires du Nord-Ouest).

Les objectifs spécifiques :

- Analyser l'évolution du couvert végétal de la région étudiée dans la dernière décennie ;
- Développer un indice de qualité de l'habitat du caribou boréal adapté à la région de Jean Marie River (Territoires du Nord-Ouest) ;
- Cartographier et analyser la qualité de l'habitat du caribou boréal dans la région de Jean Marie River (Territoires du Nord-Ouest).

## 3 CADRE THÉORIQUE

### 3.1 Caribou boréal

Le caribou (*Rangifer tarandus*) est un ongulé de taille moyenne dont l'aire de répartition est circumpolaire. Bien qu'une seule espèce de caribou soit reconnue mondialement, elle est caractérisée par de multiples variations au niveau écologique, génétique, comportementale et morphologique. En Amérique du Nord, quatre sous-espèces sont présentes : le caribou de la toundra (*Rangifer tarandus groenlandicus*), le caribou de Grant (*Rangifer tarandus granti*), le caribou de Peary (*Rangifer tarandus pearyi*) et le caribou des bois (*Rangifer tarandus caribou*) (COSEPAC, 2011). À l'intérieur de ces sous-espèces, des populations distinctes ont été délimitées selon leurs caractéristiques et habitats. Dans les Territoires du Nord-Ouest, deux populations de caribou des bois sont présentes, différenciées principalement par leur type d'habitat, soit la population boréale et la population des montagnes du Nord (Species at Risk Committee, 2012). Sur le territoire de la communauté de Jean Marie River, c'est la population du caribou boréal qui est retrouvée (Dehcho First Nations, 2011).

### 3.1.1 Description générale du caribou boréal

La population est caractérisée par un pelage foncé à brun fauve qui tend plus vers des teintes grisâtres durant la saison hivernale avec le cou, les côtés et le dessous de la queue blancs. Les femelles comme les mâles possèdent des bois, mais ceux de la femelle sont plus étroits. Leurs larges sabots leur permettent de se déplacer facilement sur différentes surfaces, comme la neige ou les fondrières de mousse (Conference of Management Authorities, 2017; Species at Risk Committee, 2012). Une photographie est disponible à la figure 3.1.



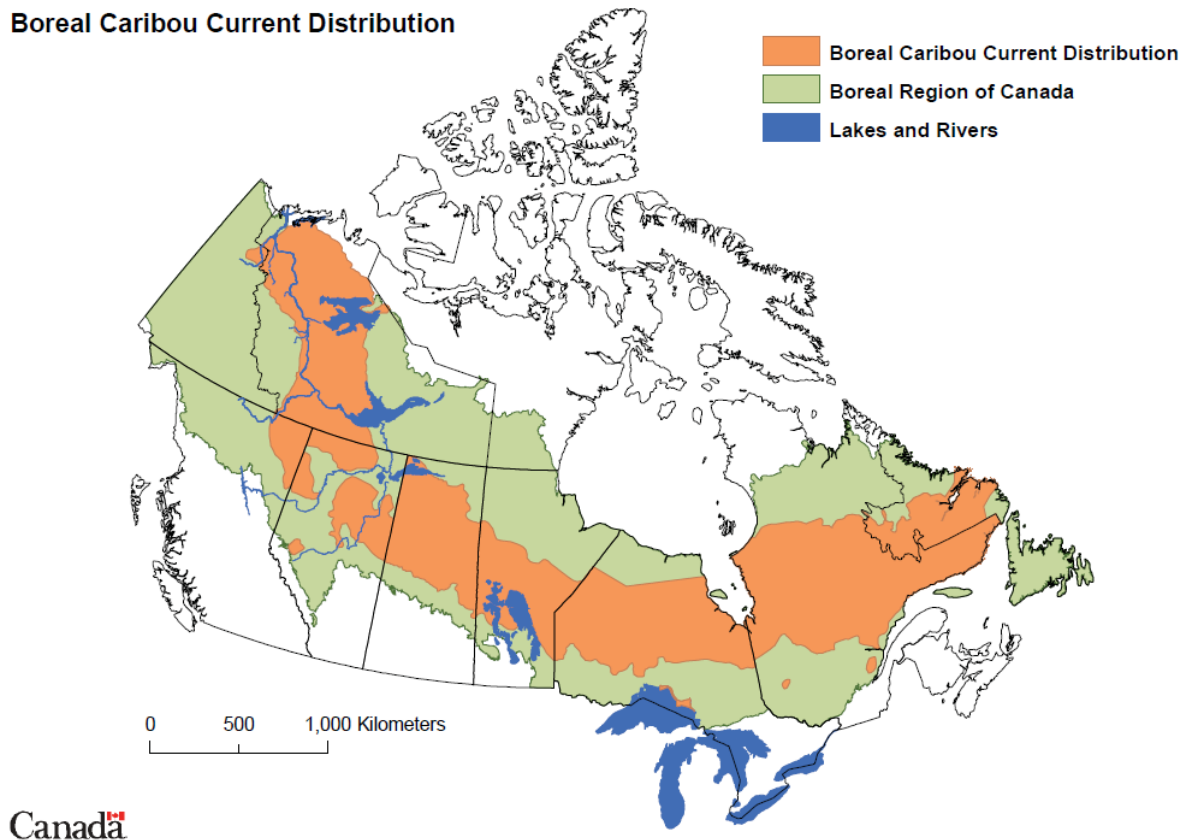
*Figure 3.1 Photographie d'un caribou boréal (Conference of Management Authorities, 2017)*

La population du caribou boréal est considérée comme étant sédentaire (COSEPAC, 2011; Environment Canada, 2008), c'est-à-dire qu'elle ne parcourt habituellement pas une grande distance entre ses différents territoires saisonniers, mais il y a une dispersion des femelles lors de la mise bas pour se protéger des prédateurs (COSEPAC, 2011). Habituellement, le caribou boréal se tient en petits groupes de 1 à 5 individus, mais il est

possible d'observer des groupes de plus grande envergure selon la région et la saison (Conference of Management Authorities, 2017).

En 2003, le Comité sur la situation des espèces en péril au Canada a ajouté la population du caribou boréal au Registre public des espèces en péril comme étant une population menacée selon la *Loi sur les espèces en péril*. Aux Territoires du Nord-Ouest, la population a été inscrite comme étant une population menacée en 2014, suite aux recommandations du *NWT Species at Risk Committee* (Conference of Management Authorities, 2017; Gouvernement du Canada, 2018).

La distribution de la population du caribou boréal au Canada s'étend sur sept provinces et deux territoires et est présentée à la figure 3.2.



*Figure 3.2 Distribution du caribou boréal sur le territoire canadien (Environment Canada, 2008)*

Dans les Territoires du Nord-Ouest, une représentation cartographique de la distribution de la population a été produite à partir des connaissances traditionnelles et du savoir



scientifique par le *Species at Risk Committee* (Species at Risk Committee, 2012). Elle est disponible à la figure 3.3.

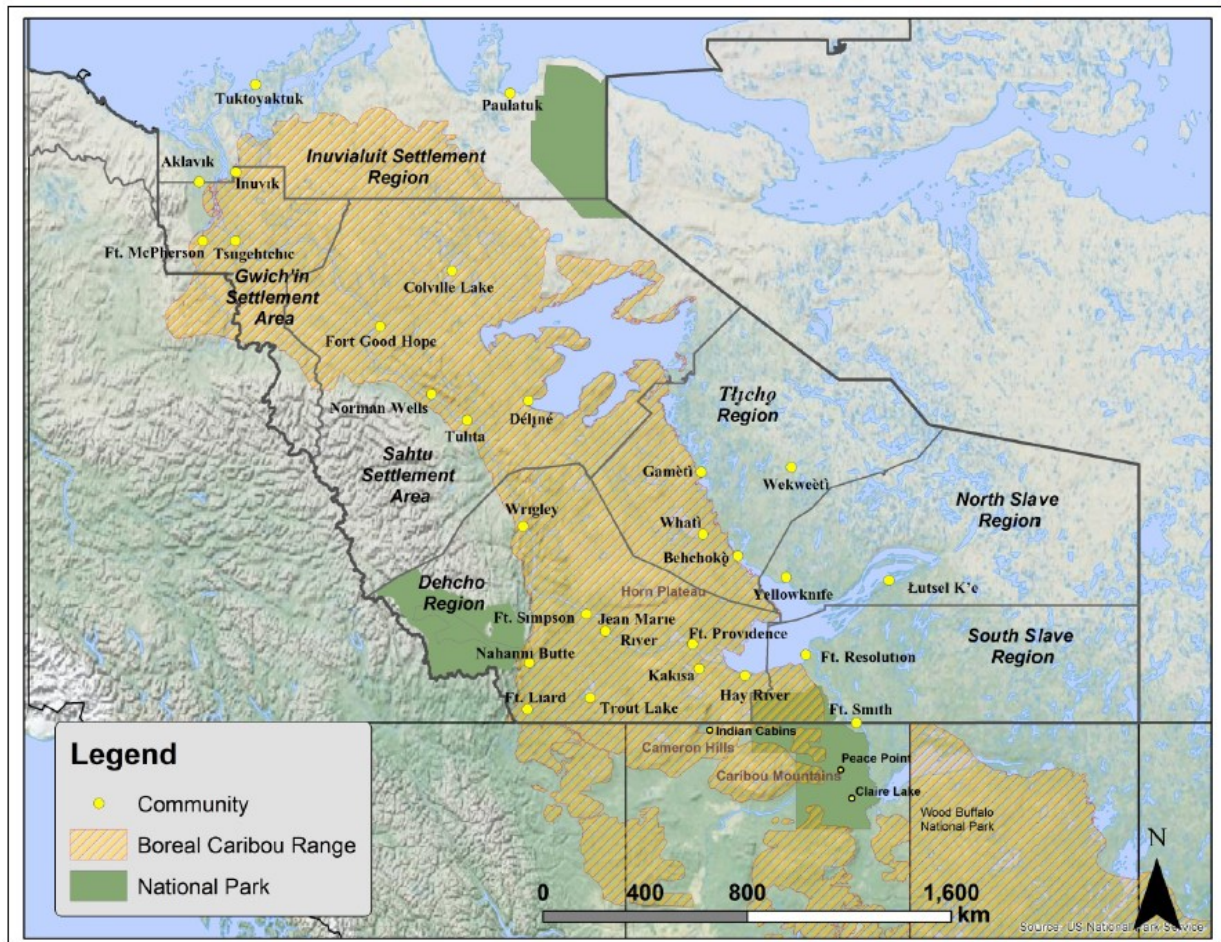


Figure 3.3 Distribution du caribou boréal dans les Territoires du Nord-Ouest (Species at Risk Committee, 2012)

Le nombre de caribous boréal estimé dans cette région est entre 6 000 et 7 000 individus (Conference of Management Authorities, 2017). La population se situe majoritairement à l'intérieur de l'écozone de la Taïga des plaines. Cette écozone est caractérisée par une topographie plane à légèrement vallonnée et est dominée par des tourbières entrecoupées, sur les hauts plateaux, de forêts de conifères et de forêts mixtes ainsi que de zones occupées principalement par des arbustes (Environment Canada, 2008).

### 3.1.2 Habitat du caribou boréal

Comme il a été mentionné dans la section précédente, la population du caribou boréal est considérée comme étant sédentaire et n'effectue pas de grandes migrations entre les

saisons, toutefois il se déplace selon ses besoins saisonniers (Conference of Management Authorities, 2017). Plusieurs éléments guident la sélection de l'habitat, les facteurs principaux sont l'exposition à la prédation, l'accès à la nourriture ainsi que le microclimat du territoire (Environment Canada, 2008). Dans la région étudiée, on associe la présence du caribou boréal à l'épinette noire (*Picea mariana*) et au lichen (Arboquebecium, 2018; Environment Canada, 2008).

En hiver, le caribou boréal se rassemble en plus grands groupes et occupe les forêts denses d'épinettes ou de pins, caractérisées par la présence de lichens sur les arbres (Species at Risk Committee, 2012; Dehcho First Nations, 2011). Durant cette saison, le lichen est considéré comme la première source d'alimentation de cette population (Leblond et al., 2014a). Il y a peu de déplacement jusqu'au début de la fonte de la neige et le caribou boréal passe peu de temps dans les zones ouvertes ou les fondrières de mousse (Species at Risk Committee, 2012), mais il y recherche toutefois du carex pour diversifier son alimentation (Dehcho First Nations, 2011).

Au printemps, le facteur dictant la sélection de l'habitat est principalement la présence de prédateurs (loups, ours noirs et grizzly) pour la période de vêlage. Les femelles préfèrent les crêtes surélevées ainsi que les milieux humides, comme les marais, qui sont plus difficiles d'accès pour les prédateurs (Species at Risk Committee, 2012; Dehcho First Nations, 2011).

Durant l'été, la menace des prédateurs reste importante pour les faons, mais les insectes sont aussi une nuisance (Species at Risk Committee, 2012). Dans la région de Dehcho, l'habitat estival du caribou boréal est principalement les fondrières de mousses (Dehcho First Nations, 2011) ainsi que les zones caractérisées par la présence de pergélisol et de mousse qui permettent au caribou de se rafraîchir en s'y couchant. La proximité des cours d'eau est aussi recherchée afin de se protéger des insectes (Species at Risk Committee, 2012).

L'automne dans cette région est caractérisé par l'occurrence de brouillards, le caribou boréal préfère donc les zones surélevées afin d'avoir une meilleure visibilité. Il y a une augmentation dans le nombre de déplacements des mâles pour la saison du rut, mais une

préférence pour les fondrières de mousse est observée (Species at Risk Committee, 2012).

### 3.1.3 Menaces pour l'espèce

Les conditions variables entraînées par les changements climatiques dans les régions nordiques modifient la relation du caribou boréal avec son territoire (Mallory and Boyce, 2018). La population est très sensible aux perturbations de son habitat engendrées autant par les activités anthropiques que naturelles (Conference of Management Authorities, 2017). Le tableau 3.1 résume les multiples menaces pour la pérennité de l'espèce.

*Tableau 3.1 Menaces pour le caribou (Inspiré de Mallory and Boyce, 2018; Conference of Management Authorities, 2017)*

Catégories	Menaces
Territoire estival	Modification de la qualité et de la quantité du fourrage
	Variation de la phénologie
	Modification du type de végétation
	Augmentation du nombre de feux de forêt
Territoire hivernal	Perte d'habitats riches en lichen
	Dégradation de l'état de la communauté végétale
Conditions météorologiques extrêmes	Augmentation du nombre de cas de pluie sur neige et de dégel cyclique
	Dégel du pergélisol entraînant l'apparition de thermokarsts
Distribution	Modification de la distribution des différentes espèces
	Augmentation de la prédation
Parasites et maladies	Variation dans la durée de la présence des insectes
	Modification de la distribution géospatiale et du taux de transmission des parasites et maladies
Causes anthropiques	Modification du territoire (routes, lignes de sondage sismique...)
	Perturbations du territoire par les activités anthropiques (exploitations minières)

La disponibilité et la qualité des habitats répondant aux besoins du caribou, lors de la période estivale et hivernale, sont grandement influencées par les changements climatiques. L'été est une période importante d'alimentation pour le caribou, les femelles



doivent répondre aux besoins des faons et la population doit accumuler de l'énergie pour se préparer aux conditions plus difficiles de l'hiver. L'influence des changements climatiques entraîne plusieurs modifications dans la qualité, la quantité ainsi que le type de végétation retrouvée (Mallory and Boyce, 2018). Ces modifications peuvent être liées au dégel du pergélisol, évènement accentué par les changements climatiques. Selon la quantité de glace retrouvée dans le pergélisol, des phénomènes thermokarstiques peuvent avoir lieu, modifiant la dynamique du territoire surtout en lien avec le système de drainage des eaux. Ces modifications amènent des changements permanents dans l'occupation du sol au niveau de la végétation ainsi que par l'apparition ou l'assèchement de lacs et de milieux humides (Gouvernement des Territoire du Nord-Ouest, 2014a; Gouvernement des Territoire du Nord-Ouest 2014b). Le dégel du pergélisol est aussi sensible à l'augmentation de feux de forêt dans la région, favorisée par l'occurrence d'étés plus chauds et secs. En plus de leur influence sur le dégel du pergélisol, les feux amènent une diminution de territoires occupés par les forêts matures, une source importante de lichen pour les caribous lors de la saison hivernale (Mallory and Boyce, 2018). Les territoires touchés par les feux de forêt sont habituellement évités par la population, ce qui entraîne une perte d'habitat (Conference of Management Authorities, 2017; Species at Risk Committee, 2012).

Les conditions météorologiques extrêmes sont aussi une menace pour la population (Mallory and Boyce, 2018). Des cas de pluie sur neige entraînent la formation d'une couche de glace qui rend difficile l'accès au fourrage durant la saison hivernale. Afin de survivre à cette situation, le caribou boréal risque de se déplacer vers un autre territoire ou de subir les effets, parfois mortels, de la malnutrition (Species at Risk Committee, 2012; Dehcho First Nations, 2011).

La modification des habitats par des causes anthropiques ou naturelles peut amener différentes espèces à migrer vers des territoires, souvent plus au nord, convenant mieux à leurs besoins. Ces changements dans la distribution des espèces ont comme conséquence d'augmenter la compétition pour les ressources ainsi que le risque de maladies et parasites sur les territoires occupés par le caribou. Le taux de transmission des parasites

et maladies se voit augmenté, influencé par le climat plus clément qui engendre aussi une variation dans la durée de la présence des insectes nuisibles (Mallory and Boyce, 2018).

La perturbation de l'environnement modifie la relation entre le caribou boréal et ses prédateurs (Conference of Management Authorities, 2017). La population boréale préfère éviter les forêts caractérisées par un jeune stade évolutif qui sont préférées par d'autres animaux, tels les orignaux, augmentant la variété de proies pour les prédateurs (Species at Risk Committee, 2012). Ce jeune stade évolutif des forêts est favorisé par les différentes modifications naturelles et anthropiques ayant lieu sur un territoire. Afin d'éviter les prédateurs, le caribou boréal a besoin de grandes zones de vieilles forêts de conifères limitrophes et exemptes de perturbations (Conference of Management Authorities, 2017; Environment Canada, 2008).

Le développement ainsi que les activités anthropiques sont aussi des éléments contraignants pour l'espèce. Il a été observé que les caribous ont tendance à éviter les zones entourant les développements anthropiques, telles les routes ou les lignes de sondage sismiques. Les caribous sédentaires, comme le caribou boréal, semblent être plus sensibles aux obstacles linéaires que les caribous migrants (Dyer et al., 2002). En ce qui concerne les pipelines, lorsqu'ils sont moins de 1.5 m ou enterrés, il a été démontré qu'ils avaient une faible influence sur l'animal (Curatolo and Murphy, 1986; Noel et al., 2006). Plus l'activité humaine est forte dans un développement, plus le caribou a tendance à ne pas côtoyer les environs (Dyer et al., 2001). Par exemple, les activités minières ont une influence sur la distribution des caribous qui tentent d'éviter les exploitations minières entraînant une perte de territoire pour l'animal (Weir et al., 2007).

### **3.2 Communauté de Jean Marie River**

La communauté de Jean Marie River, située sur la berge de la rivière Mackenzie dans les Territoires du Nord-Ouest (Jean Marie First Nation, s.d), est un des dix peuples représentés par les Premières Nations du Dehcho (Ministère de l'Exécutif et des Affaires autochtones, s.d). Elle fait partie aussi de la Nation Dénée, une organisation politique localisée dans les Territoires du Nord-Ouest qui rassemble le peuple nordique de langue athapascane (Dene Nation, s.d.; Asch, 2017).

### 3.2.1 Bref historique de la communauté

Avant de devenir une communauté sédentaire, la Première Nation de Jean Marie River, appelée Tthets'èhk'e Délî got'ine signifiant « l'eau qui coule sur l'argile » (Jean Marie First Nation, s.d.), se déplaçait selon les saisons et habitait des camps non permanents. Les mêmes secteurs saisonniers étaient généralement réutilisés annuellement (Jean Marie First Nation and PACTeam Canada, 2011).

C'est à partir des années 1920 que la Première Nation Jean Marie River a commencé sa transition vers un mode de vie sédentaire tout en conservant leur tradition comme la chasse, la pêche et les différents arts (Jean Marie First Nation, s.d.). Les premières familles de la communauté sont descendantes de trois sœurs provenant de Fort Providence dont les figures sont retrouvées sur le logo de la communauté (figure 3.4).



*Figure 3.4 Emblème de la communauté de Jean Marie River (Jean Marie First Nation, s.d.)*

Au milieu des années 1950, le développement d'activités économiques non traditionnelles débuta par l'exploitation forestière ainsi que le transport à partir de la rivière, ce qui entraîna des modifications dans la communauté (Jean Marie First Nation, s.d.). Les membres ont acheté collectivement un petit remorqueur pour la pêche et le transport de matériaux et ils ont commencé à utiliser une scierie portable pour l'acquisition et la distribution de bois (Brown et al., 2013). Malgré ces modifications,

l'héritage Dénée est resté très important pour la communauté qui désire le protéger afin qu'il reste partie intégrante de leur culture (Jean Marie First Nation, s.d.).

Ce n'est qu'en 1992 que la communauté de Jean Marie River est reconnue comme une Première Nation indépendante grâce à la Loi sur les Indiens. Auparavant, elle était considérée comme une sous-bande la Première Nation Líídlî Kòç, malgré qu'elle était indépendante depuis plus de 80 ans (Brown et al., 2013).

### **3.2.2 Aliments issus de la flore et de la faune sauvage**

L'acquisition des aliments pour leur diète traditionnelle provient des connaissances des Premières Nations et du besoin de développer un moyen de se nourrir à partir de son environnement. Bien ancrée dans les traditions des Premières Nations, leur diète traditionnelle est importante pour le bien-être ainsi que la survie des individus et est liée à plusieurs activités traditionnelles comme la pêche, la chasse et la cueillette (Assembly of First Nations, 2007).

En ce qui concerne la communauté de Jean Marie River, l'alimentation de toutes les familles est composée en partie d'aliments issus de la flore et de la faune sauvage comme des baies, de l'orignal, du caribou et du poisson (Jean Marie First Nation and PACTeam Canada, 2011). Ils occupent une place importante dans leur diète traditionnelle et sont considérés comme une meilleure source d'alimentation que les aliments transformés pour plusieurs raisons. Selon la communauté, une plus grande consommation d'aliments issus de la flore et de la faune sauvage pourrait aider à diminuer le nombre de cas de diabète et d'obésité grâce à ses meilleures valeurs nutritives (Calmels et al., 2014a). Son acquisition demande un effort physique aux membres et permet d'entretenir un esprit de communauté puisqu'il y a souvent un partage dans la communauté lorsque du gros gibier a été chassé (Assembly of First Nations, 2007; Calmels et al., 2014a; Jean Marie First Nation and PACTeam Canada, 2011).

De plus, l'acquisition d'aliments transformés est onéreuse et chronophage pour les membres de la communauté puisqu'il leur est nécessaire de se déplacer vers Fort Simpson (127 km) ou Hay River (360 km) pour avoir accès à un magasin d'alimentation. Il est donc important pour la communauté de conserver comme source d'alimentation les

aliments composant leur diète traditionnelle afin d'assurer leur sécurité alimentaire (Calmels et al., 2014a; Jean Marie First Nation and PACTeam Canada, 2011).

### **3.2.3 Préoccupations face aux changements climatiques**

Plusieurs recherches ont été effectuées sur les impacts des changements climatiques dans le Nord Canadien, surtout dans les régions de l'arctique et subarctique, mais il y a peu de recherche pour les territoires occupés par la Première Nation de Jean Marie River qui se retrouve entre le 60e parallèle Nord et la limite de la zone arborée dans le Nord Canadien. Pour la communauté, il est donc important de développer une meilleure connaissance des perturbations à venir ainsi que de trouver des moyens d'adaptation afin d'assurer la sécurité et le bien-être de ses membres (Jean Marie First Nation and PACTeam Canada, 2011). Face à ses préoccupations vis-à-vis les changements climatiques, la communauté a effectué une évaluation de sa vulnérabilité qui leur a permis de cibler les différentes problématiques à prendre en considération dans le développement de stratégies d'adaptation (Brown et al., 2013; Calmels et al., 2014a; Jean Marie First Nation and PACTeam Canada, 2011).

La communauté se retrouve à la frontière entre les zones de pergélisol discontinu étendu et sporadique (Brown et al., 2013). Le pergélisol est n'importe quel type de sol (sédiment, tourbe, roche, glace, etc.) ayant une température inférieure ou égale à 0 °C durant au moins deux années consécutives (Everdingen, 2005; Brown et al., 2013). Il fait partie intégrante des écosystèmes où on le retrouve et sa dégradation, causée par les variations climatiques, ou la modification des conditions de surface par cause naturelle ou anthropique, amène une modification du territoire (Brown et al., 2013). En 2013, une évaluation du pergélisol retrouvé sur le territoire a été effectuée pour déterminer les dangers potentiels. L'évaluation a permis la création d'une carte de la probabilité de présence de pergélisol et de sa vulnérabilité (Brown et al., 2013). En continuité avec cette évaluation, un projet a étendu la zone cartographiée et a déterminé les impacts possibles de la modification du territoire par le dégel du pergélisol pour la communauté en lien avec leur sécurité alimentaire (Calmels et al., 2014a). Des données GPS de six caribous côtoyant la région ont été utilisées afin d'évaluer l'impact possible du dégel du pergélisol sur la population en lien avec la carte de vulnérabilité produite. Il a été observé qu'au

moins 37,8 % des sites utilisés par les caribous chevauchent les zones évaluées dans l'étude comme vulnérable au dégel et 35,6 % avec les zones hautement vulnérables. Il a été conclu que l'habitat du caribou, composant de leur diète traditionnelle, pourrait être grandement touché par le dégel du pergélisol (Calmels et al., 2014a).

Une des inquiétudes de la communauté en lien avec les conséquences des changements climatiques concerne la difficulté à conserver leur sécurité alimentaire qui dépend de la capacité à acquérir les aliments issus de la faune et de la flore. Ce mode d'alimentation est lié à la santé des plantes et des animaux qui est de plus en plus perturbée par la modification du territoire, entraînant le déplacement ou la disparition des espèces (Assembly of First Nations, 2007; Jean Marie First Nation and PACTeam Canada, 2011). Les changements du territoire entraînés par le dégel du pergélisol tel l'apparition de dépressions/subsides thermokarstiques, qui sont des dépressions formées par l'affaissement du sol (Termium Plus, 2013), sont des facteurs pouvant rendre difficile, même dangereux, l'accès aux aliments de leur diète traditionnelle (Brown et al., 2013). De plus, la combinaison des impacts des changements climatiques et des activités anthropiques amène une augmentation du nombre de contaminants dans leur diète traditionnelle qui peut rendre dangereuse sa consommation, surtout pour les groupes à risque comme les enfants (Assembly of First Nations, 2007).

### **3.3 Indice de qualité de l'habitat**

Il y a plusieurs façons d'évaluer la qualité de l'habitat d'une espèce faunique. Le terme « habitat » peut être défini comme étant « [...] le milieu dans lequel une espèce donnée trouve, en quantité suffisante, les éléments biologiques et physiques nécessaires à sa survie et à sa reproduction » (Cheveau et Dussault, 2013). Les trois principaux types de modèles utilisés sont les clés d'évaluation du potentiel d'habitat, les cotes de qualité de l'habitat et les indices de qualité de l'habitat (IQH), mais d'autres méthodes, adaptées pour de grands territoires et complexifiées par l'utilisation d'une plus grande diversité de variable, existent (Cheveau et Dussault, 2013). L'IQH est le modèle qui a été sélectionné pour effectuer l'analyse du territoire du caribou boréal dans cet essai.

### 3.3.1 Description générale

Le premier IQH a été créé dans les années 1980 aux États-Unis pour répondre au besoin d'évaluer les conséquences des modifications anthropiques du milieu naturel pour la faune (Crête, 2003; U.S. Fish and Wildlife Service, 1981). La définition de l'IQH utilisée dans cet essai provient de Cheveau et Dussault, 2013 : « L'IQH est un modèle mathématique qui inclut plusieurs variables jugées importantes pour l'espèce. Dans un premier temps, une valeur relative est attribuée à chacune de ces variables (caractéristiques végétales ou physiques). Dans un second temps, une valeur moyenne pour l'ensemble des variables est calculée (souvent à partir d'une moyenne géométrique ou d'une somme pondérée) afin de générer un indice global, d'une valeur comprise entre 0 (qualité nulle) et 1 (qualité la plus élevée). » Il est important de noter que la qualité d'un modèle dépend des connaissances scientifiques lors de son développement (Crête, 2003).

Afin qu'un IQH soit reconnu comme fiable, il y a plusieurs étapes à accomplir : le développement, la calibration, la vérification et la validation. Le développement est la création de l'IQH qui comprend la sélection des différentes variables, l'attribution des valeurs aux variables selon leur importance ou leur caractère limitatif et la création d'un calcul mathématique pour combiner l'ensemble des valeurs choisies. Il y a plusieurs sources d'informations qui peuvent être utilisées à cette étape comme une revue de littérature, des enquêtes terrain ou l'opinion d'experts (Brooks, 1997). Lorsque l'espèce étudiée a des besoins saisonniers, cela complexifie le processus et il est nécessaire de choisir les éléments d'habitats ou les besoins saisonniers les plus critiques (Cheveau et Dussault, 2013; Crête, 2003). Les avancées dans le domaine de la géomatique et de la statistique ont permis de faciliter l'acquisition des données ainsi que l'utilisation d'équations avec plusieurs variables (Crête, 2003). Ensuite, l'étape de la calibration permet d'évaluer la sensibilité du modèle et comment il réagit selon la variabilité de l'habitat en effectuant plusieurs simulations entre diverses zones ou avec des données empiriques. Par la suite, la vérification compare l'évaluation de la qualité de l'habitat d'un site indépendant à partir de données différentes que celles utilisées pour bâtir le modèle. Finalement, la validation est la comparaison des résultats de l'IQH avec ceux d'un autre indicateur de la qualité de l'habitat, comme un inventaire de densité. Il n'est

pas nécessaire d'accomplir toutes les tâches avant de partager l'avancement de la création d'un IQH, toutefois il est important lors de la publication d'un IQH de mentionner quelle est son étape de développement pour en informer les potentiels utilisateurs (Brooks, 1997; Cheveau et Dussault, 2013).

Lors de l'utilisation d'un modèle comme l'IQH pour évaluer la qualité de l'habitat, il est important de garder à l'esprit que les résultats ne sont qu'une approximation de la réalité puisque la relation de l'espèce avec son environnement y est simplifiée. Un IQH pour une espèce spécifique peut être utilisé dans différentes régions, mais il se peut que des adaptations soient nécessaires, surtout si le modèle a été conçu pour une région spécifique (Cheveau et Dussault, 2013; Crête, 2003).

### **3.3.2 Application de l'IQH pour l'étude du caribou**

Un IQH est un outil de gestion à considérer afin d'identifier les zones d'intérêts pour une espèce menacée et ainsi prévoir un plan d'action pour sa préservation, l'aménagement du territoire ou sa réintroduction (Crête, 2003).

Il est possible de retrouver dans la littérature plusieurs exemples d'applications d'IQH pour l'étude du caribou. Puisqu'il y a une grande variété dans le comportement et les préférences d'habitat pour les différentes sous-espèces et populations, plusieurs IQH ont été créés ou modifiés pour répondre aux besoins des utilisateurs (Côté and Doyon, 2004; Hansen et al., 2001; Horne et al., 2014). Certains IQH produits pour l'étude du caribou ont choisi de qualifier l'habitat saisonnier favorable pour le vêlage ou pour la saison hivernale (Côté and Doyon, 2004; Hansen et al., 2001). D'autres IQH prennent comme variables les caractéristiques critiques ou limitatives pour l'espèce, sans prendre en considération les limites saisonnières (Horne et al., 2014; Leblond et al., 2014a).

Les sources utilisées pour la création d'un IQH sont aussi variées. Une étude sur le caribou de Grant en Alaska a produit son propre IQH à partir de données de télémétrie à très haute fréquence provenant de colliers émetteurs présent entre 1994 et 2009 sur deux troupeaux en Alaska central (Horne et al., 2014). Une autre étude, pour le caribou des bois dans l'ouest de Terre-Neuve, a développé ses IQH en combinant les informations obtenues à partir d'une revue de littérature et des modèles d'IQH déjà existants (Côté and



Doyon, 2004). Comme il a été mentionné plus haut, l'avis d'expert est aussi une source d'information intéressante pour la production d'un IQH et on retrouve son utilisation dans une étude désirant produire un IQH adapté pour le caribou boréal au Québec (Leblond et al., 2014a).

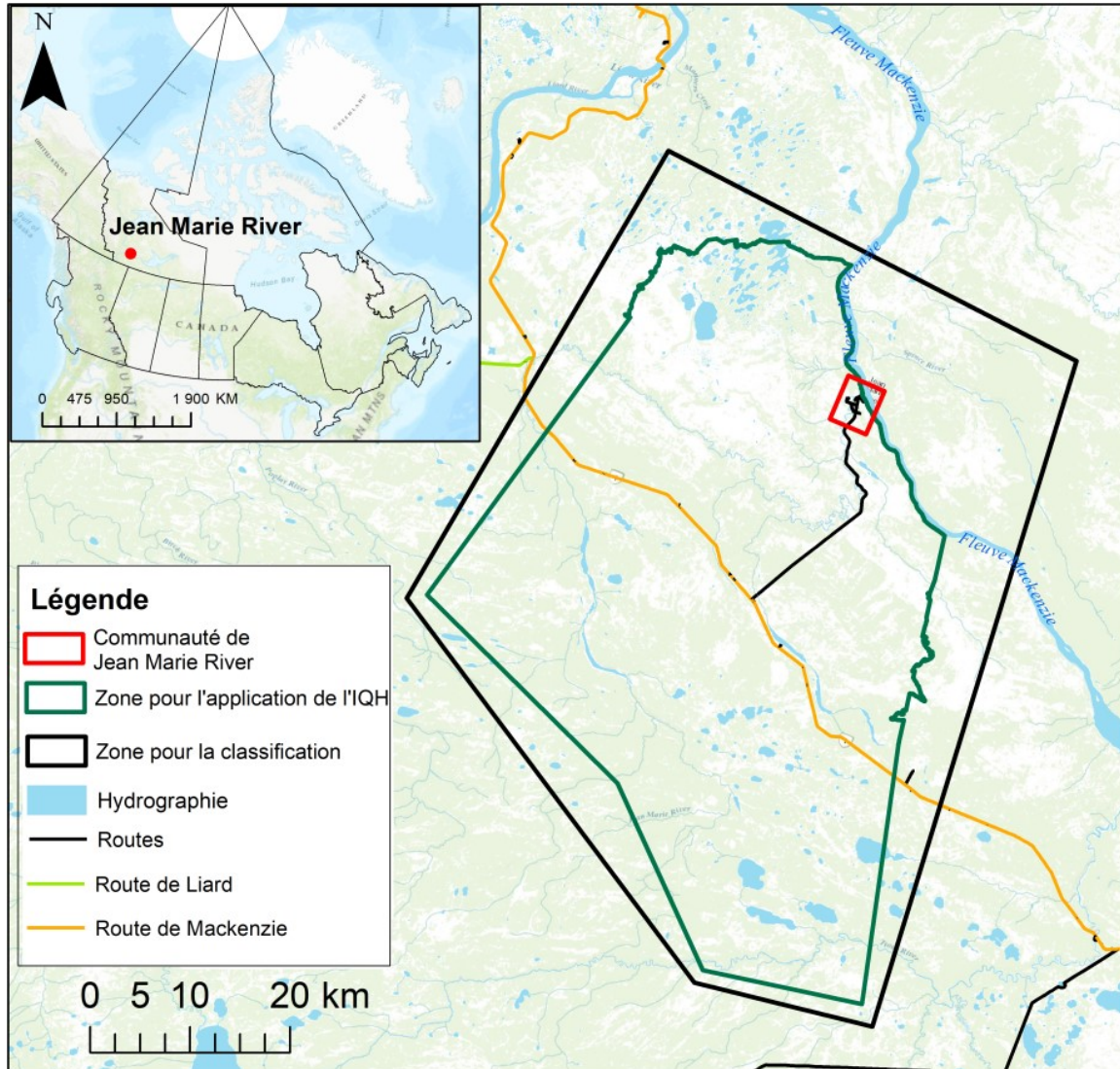
L'utilisation d'un outil comme l'IQH permet d'étudier un territoire selon les besoins de l'espèce ciblée. Le but recherché peut être simplement de développer une meilleure connaissance du caribou et de son interaction avec son environnement afin de pouvoir fournir un outil de gestion de la faune pour différents projets (Côté and Doyon, 2004; Leblond et al., 2014a). Il est aussi possible d'observer l'impact sur la qualité de l'habitat de l'évolution d'un territoire sur une période de temps (Hansen et al., 2001).

## 4 DONNÉES ET MÉTHODES

### 4.1 Site d'étude

La zone d'étude, habitée par la communauté autochtone de Jean Marie River, est située au 61°30'41.0"N 120°39'57.6"O, dans la région administrative de Dehcho dans les Territoires du Nord-Ouest, au Canada. La température moyenne maximale dans la zone d'étude est de 17°C au mois de juillet et on retrouve au mois de janvier la température moyenne minimale à -25°C. En ce qui concerne les précipitations, la moyenne annuelle pour la pluie est de 224 mm et de 170 cm pour la neige (Weather Network, 2019). L'écorégion du territoire est le *Great Slave Plain* qui est caractérisée par des terres marécageuses de faible altitude ainsi qu'une végétation composée de saules (*Salix spp.*), d'épinettes (*Picea spp.*) denses, de pins (*Pinus spp.*) et de peupliers (*Populus spp.*) (JeanMarie First Nation and PACTeam Canada, 2011). Deux aires d'études ont été délimitées pour le projet (figure 4.1). La première zone a été déterminée lors du projet « Food security vulnerability assessment related to permafrost degradation in the Jean Marie River First Nation » (Calmels et al., 2014a). Elle est utilisée afin de pouvoir comparer, dans le futur, l'IQH avec la carte de la vulnérabilité du pergélisol qui a été produite dans le projet. La deuxième zone, utilisée pour la classification de la végétation, a été étendue afin d'avoir une zone tampon de 1,5 km autour de l'aire employée pour

l'IQH, ainsi que pour couvrir le territoire de la Classification de 2011 qui a été produit dans le projet de Calmels et al., (2014a).



Service Layer Credits: Sources: Esri, HERE, DeLorme, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, MapmyIndia, © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community

Carte réalisée par Alexandra Lavoie,  
Université de Sherbrooke, Sherbrooke  
16 avril 2018  
Données utilisées :  
Calmels et al., 2014a; U.S. Department of the Interior, 2018a.

*Figure 4.1 Cartographie des différentes zones d'études*

Un organigramme général de la méthodologie de l'essai est présenté à la figure 4.2. La méthodologie comporte deux étapes principales qui sont d'effectuer la classification de la végétation et l'application d'un indice de qualité de l'habitat pour le caribou boréal. La première étape comprend la classification d'images satellites pour l'année 2011 et 2017 ainsi qu'une comparaison spatiotemporelle de la végétation pour ces deux années. La deuxième étape débute par le choix de l'IQH ainsi que son adaptation à la réalité du territoire. Par la suite, l'IQH est appliqué sur la zone d'étude pour l'année 2017.

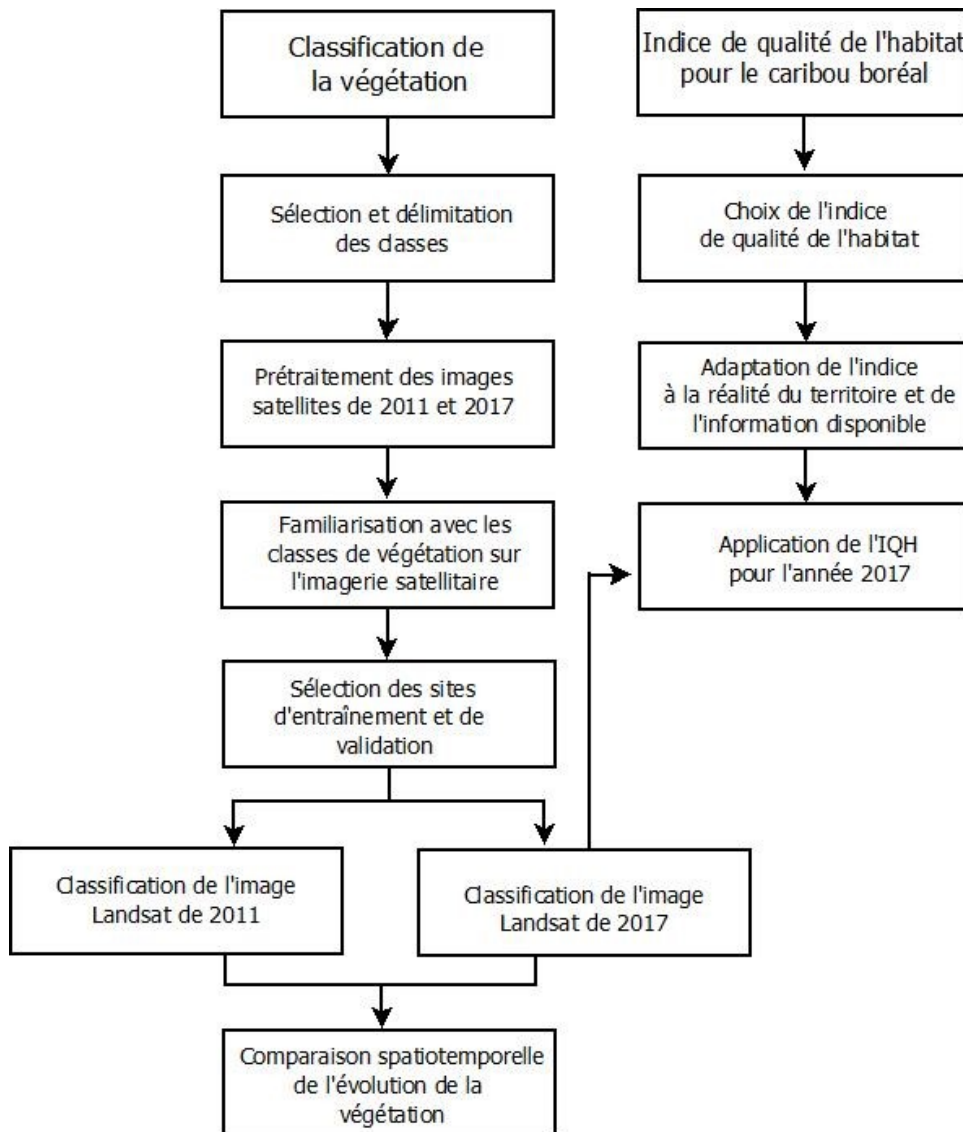


Figure 4.2 Organigramme méthodologique général de l'essai

## 4.2 Données

### 4.2.1 Données pour la classification

Plusieurs images satellites et couches vectorielles ont été utilisées pour l'étape de la classification (tableau 4.1).

*Tableau 4.1 Données utilisées pour la classification (Calmels et al., 2014; ESA, 2018a; Ressources naturelles Canada, 2017a; Ressources naturelles Canada, 2017 b; U.S. Department of the Interior, 2018a)*

Donnée	Date	Source	Acquisition	Format	Résolution / Échelle
Image Landsat 8 / Capteur Operation Land Imager (OLI)	8 août 2017	U.S. Geological Survey	<i>Earth Explorer</i> (Licence libre)	Matricielle, images GeoTIFF	30 m
Image Landsat 5 / Capteur Thematic Mapper (TM)	27 août 2011	U.S. Geological Survey	<i>Earth Explorer</i> (Licence libre)	Matricielle, images GeoTIFF	30 m
Image Sentinel 2 / Capteur Multi- Spectral Instrument (MSI) S2A	10 août 2017 6 septembre 2017	European Space Agency / Copernicus	<i>Copernicus Open Access Hub</i> (Licence libre)	Matricielle, images GML- JPEG2000	10 m (B2, B3, B4, B8) 20 m (B5, B6, B7, B8A, B11, B12) 60 m (B1, B9, B10)
Segments routier (road)	2017	Carte topographique CanVec / Ressources naturelles Canada	The Atlas of Canada - Toporama (Licence libre)	Vectorielle, Ligne	50 k
Région hydrique (waterbody)	2017	Carte topographique CanVec / Ressources naturelles Canada	The Atlas of Canada - Toporama (Licence libre)	Vectorielle, Surface	50 k
Piste d'envol (runway)	2017	Carte topographique CanVec / Ressources naturelles Canada	The Atlas of Canada - Toporama (Licence libre)	Vectorielle, Surface	50 k
Données vérité terrain géolocalisées	2017	Cyrielle Laurent	Cyrielle Laurent	Point GPS	-
Classification de la végétation de 2011	2014	Calmels et al. (2014a)	Cyrielle Laurent	Vectorielle, Surface	-

Le choix de l'image Landsat 8-Operation Land Imager (OLI) pour la Classification de 2017 a été effectué suite à une recherche sur la plateforme *Earth Explorer* (U.S. Department of the Interior, 2018a) pour la période du 1<sup>er</sup> août au 30 septembre, soit environ 1 mois avant et après la date de l'image du capteur Thematic Mapper (TM) de Landsat 5 utilisée pour la classification de 2011. L'image du 8 août 2017 a été retenue à cause de la faible couverture nuageuse sur la zone d'étude.

Pour délimiter les zones d'entraînements et de validation, trois images du 10 août 2017 et une image du 9 septembre 2017, provenant du satellite Sentinel 2-Multi-Spectral Instrument (MSI) S2A, ont été utilisées en combinaison avec des points GPS géolocalisant des sites de vérité terrain visités par une équipe envoyée par Mme Cyrielle Laurent, spécialiste en SIG au Centre de recherche du Yukon pour le Northern Climate Exchange. Chaque catégorie de végétation, délimitée lors de la première classification, a entre 5 et 6 points GPS enregistrés. L'image du capteur TM de Landsat 5-TM a aussi été utilisée en combinaison avec la couche vectorielle de la classification de 2011 (Calmels et al., 2014a) afin de familiariser l'opératrice avec les différentes caractéristiques des classes de végétation.

Des couches vectorielles provenant des cartes topographiques CanVec de Ressources Naturelles Canada ont aussi été employées pour produire un masque pour les classifications.

#### 4.2.2 Données pour l'indice de qualité de l'habitat

Concernant l'indice de qualité de l'habitat, les données utilisées proviennent majoritairement des cartes topographiques CanVec de Ressources Naturelles Canada. L'information sur les feux de forêt a été acquise à partir du site Internet du Centre de géomatique des Territoires du Nord-Ouest. Les différentes couches utilisées sont présentées au tableau 4.2.

*Tableau 4.2 Données vectorielles utilisées pour l'IQH (Ressources naturelles Canada, 2017a; Ressources naturelles Canada, 2017 b; Northwest Territories Centre for Geomatics, 2018)*

Source	Date mise à jour	Nom de la couche	Géométrie	Échelle
Couches vectorielles CanVec	2001	Bandes défrichées ( <i>cutline</i> )	Ligne	50k
	2017	Segment routier ( <i>road</i> )	Ligne	50k
	2001	Chemin forestier ( <i>trail</i> )	Ligne	50k
Northwest Territories Centre for Geomatics	2016	Historique des feux de forêt du Territoires du Nord-Ouest ( <i>NWT Fire History</i> )	Surface	50k

Les couches vectorielles ont été soumises à plusieurs manipulations afin de pouvoir être utilisées comme variable dans l'IQH (voir section 4.4.3). La couche vectorielle du résultat de la classification de 2017 a aussi été utilisée pour certaines variables de l'habitat.

### 4.3 Classifications

La classification de 2017 a été effectuée selon la méthodologie de la classification produite pour le projet « Food security vulnerability assessment related to permafrost degradation in the Jean Marie River First Nation » (Calmels et al., 2014b) en utilisant le logiciel de traitement d'images de télédétection ENVI ainsi que l'application ArcMap du logiciel ArcGIS. Les étapes principales de la classification sont présentées à la figure 4.3.

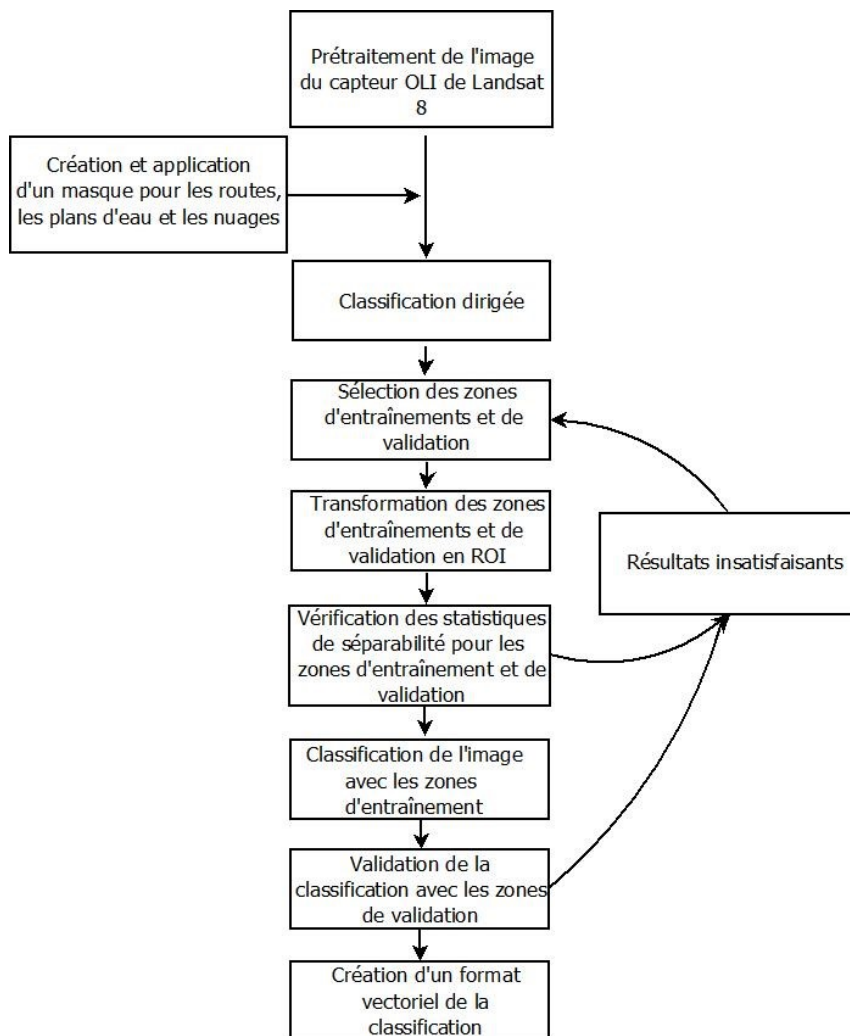


Figure 4.3 Résumé des étapes effectuées pour la classification de 2017



### 4.3.1 Sélection et définition des classes

Les classes utilisées pour la classification de la végétation sont composées des quatre classes qui ont été définies lors du projet de Calmels et al., (2014a), plus une classe pour les zones brûlées qui a été ajoutée pour l'année 2017 seulement. Il y a tout d'abord deux classes pour les milieux humides, soit *Tourbière avec mousse* qui comprend les tourbières caractérisées par une couverture de mousse, principalement des sphaignes (*Sphagnum*) ainsi que *Tourbière avec arbuste* qui comprend les tourbières avec des arbustes, graminées (*Poaceae*) et des carex (*Carex*). Par la suite, il y a la classe *Conifère* qui comprend la forêt de conifères ainsi que les forêts mixtes à dominance de conifère et la classe *Mixte* qui comprend les forêts de feuillus ainsi que les forêts mixtes avec une dominance de feuillus (Calmels et al., 2014a; Calmels et al., 2014 b).

Une classe pour les zones brûlées en régénération n'a pas été déterminée comme nécessaire lors de la classification de 2011 effectuée par Calmels et al., (2014a). Toutefois, en observant les images satellites de Sentinel 2-MSI S2A pour l'année 2017, il a été observé de nombreuses zones qui semblaient avoir été touchées par des feux de forêt. Après une vérification avec la couche spatiale de l'historique des feux de forêt des Territoires du Nord-Ouest, il a été possible de confirmer que de grandes portions du territoire étudié avaient été touchées par des feux entre les années 2011 et 2017. Il est possible d'observer l'étendue des zones touchées par les feux selon les années à la carte 4.4.

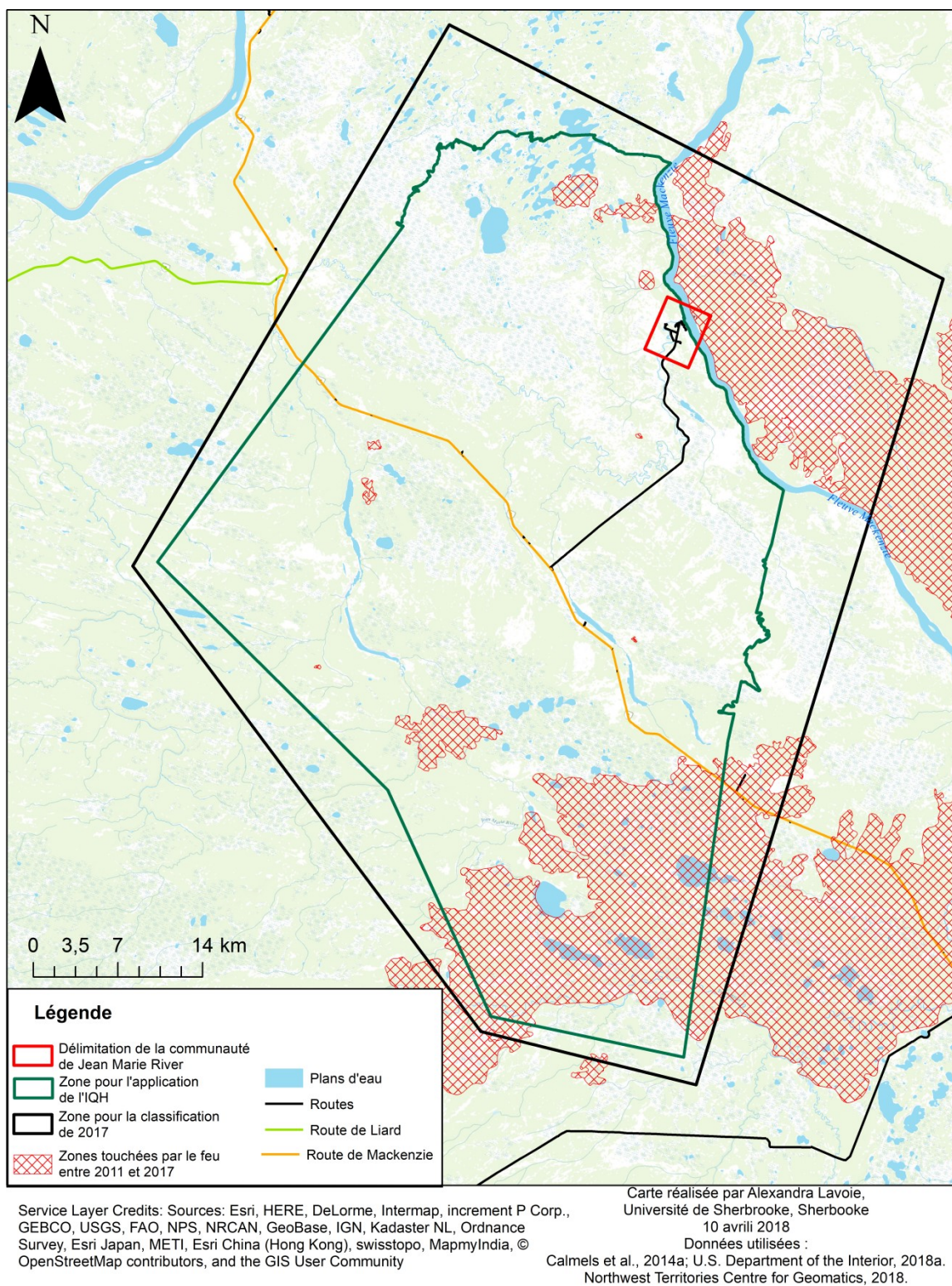


Figure 4.4 Cartographie des feux de forêt entre 2011 et 2017



Selon les observations, il a été considéré qu'il y avait encore plusieurs zones en régénération et qu'il était important de créer une classe *Sol nu/feu* afin de limiter la confusion dans le classement des pixels.

#### 4.3.2 Prétraitements




















La première étape de la classification a été le prétraitement de l'image Landsat 8-OLI de 2017 et de l'image Landsat 5 TM de 2011 dans ENVI, basé sur celui effectué dans la méthodologie de Calmels et al., (2014b). Tout d'abord, il y a eu l'application du *Gain* et du *Offset* pour chacune des bandes des images satellites afin d'effectuer une correction radiométrique. Par la suite, la méthode de soustraction de l'objet sombre a été employée en utilisant la valeur numérique (DN) minimale de chaque bande pour la correction atmosphérique des images (Mather and Tso, 2016). Ensuite, un masque pour les routes et plans d'eau a été produit en utilisant les couches vectorielles des segments routiers, des pistes d'envol et des régions hydriques de CanVec. Une zone tampon de 75 mètres a été appliquée afin de compenser pour les incertitudes liées au positionnement exact des entités géographiques des couches vectorielles (Calmels et al., 2014b). Pour le masque des nuages, les valeurs des pixels liées aux nuages ont été déterminées manuellement selon les observations de l'opératrice via la bande 9 *Cirrus* (1.363 – 1.384  $\mu\text{m}$ ) par la suite un masque a été créé et appliqué à l'image Landsat 8-OLI. La même opération a été effectuée pour l'image Landsat 5-TM avec la bande 3 (0.45 – 0.52  $\mu\text{m}$ ).

#### 4.3.3 Familiarisation avec les classes d'intérêt sur l'imagerie satellitaire

Afin de se familiariser à l'identification des classes ciblées, l'image Landsat 5-TM de la classification de 2011 a été utilisée. Une couche vectorielle de perfectionnement a été créée afin de permettre à l'opératrice de pratiquer la délimitation des polygones pour chaque catégorie en utilisant des composés vraies couleur ainsi que des composés fausses couleur avec une combinaison de bandes 4(R), 5(G) et 3(B). Afin de faciliter la tâche, l'information concernant les caractéristiques spectrales des différentes classes définies pour la classification de 2011 a été employée (Calmels et al., 2014b). Les données vérité terrain des différentes catégories ont aussi été utilisées afin de guider la délimitation des différentes zones. Ensuite, les zones d'entraînement et de validation pour chacune des classes ont été sélectionnées sur des images indépendantes, soient les images Sentinel 2-

MSI S2A de 2017. Le tableau 4.3 contient une brève description des caractéristiques liées aux couleurs des différentes classes, selon le composé couleur et le satellite utilisé.

*Tableau 4.3 Description des couleurs perçues pour les différentes classes selon le composé coloré et le type d'image satellite (modifié de Calmels et al., 2014 b; Peters, 2015)*

Classe	Composés couleur				
	Rouge(R), Vert(G), Bleu(B)		Proche infrarouge(R)/ Infrarouge onde courte(G)/ Rouge(B)		Infrarouge onde courte 2(R)/ Proche infrarouge(G)/ Bleu(B)
Conifère	Caractéristiques				
	Vert foncé avec texture (cime)		Vert foncé		-
	Satellites				
	Landsat 5-TM 	Sentinel 2-MSI S2A 	Landsat 5-TM 	Sentinel 2-MSI S2A 	-
Mixte	Caractéristiques				
	Vert avec texture (cime)		Orange foncé avec quelques teintes de vert		-
	Satellites				
	Landsat 5-TM 	Sentinel 2-MSI S2A 	Landsat 5-TM 	Sentinel 2-MSI S2A 	-
Tourbière avec mousse	Caractéristiques				
	Teintes orangées tirant sur le brun		Rose pâle à foncé tirant sur le violet		-
	Satellites				
	Landsat 5-TM 	Sentinel 2-MSI S2A 	Landsat 5-TM 	Sentinel 2-MSI S2A 	-
Tourbière avec arbuste	Caractéristiques				
	Vert pâle sans la texture des cimes		Jaune-orange tirant sur le vert		-
	Satellites				
	Landsat 5-TM 	Sentinel 2-MSI S2A 	Landsat 5-TM 	Sentinel 2-MSI S2A 	-
Sol nu/feu	Caractéristiques				
	Brun et gris		Turquoise tirant sur le vert		Magenta
	Satellites				
	Sentinel 2-MSI S2A 		Sentinel 2-MSI S2A 		Sentinel 2-MSI 

Le tableau 4.4 illustre la comparaison des bandes entre Landsat 8-OLI, Landsat 5-TM et Sentinel 2-MSI S2A. Puisqu'une faible variabilité entre les différentes valeurs a été

observée, les bandes ont été jugées comme équivalentes pour l'essai. Les bandes de Sentinel 2-MSI S2A utilisées ont une résolution de 10 m sauf pour les bandes 11 et 12 qui ont une résolution de 20 m (ESA, 2018b). Des couches vectorielles d'essai ont été produites et transformées en *Region Of Interest* (ROI) dans le logiciel ENVI à partir desquelles des statistiques de séparabilité ont été produites.

*Tableau 4.4 Comparaison entre les bandes utilisées de Landsat 5-TM, Landsat 8-OLI et Sentinel 2-MSI S2A (U.S. Department of the Interior, 2018b; ESA, 2018b)*

Satellites	Bandes		
Landsat 5-TM	Bleu	Vert	Rouge
	B1 (0,45 - 0,52 $\mu\text{m}$ )	B2 (0,52 - 0,60 $\mu\text{m}$ )	B3 (0,63 - 0,69 $\mu\text{m}$ )
	Proche Infrarouge	Infrarouge onde courte	Infrarouge onde courte 2
	B4 (0,76 - 0,90 $\mu\text{m}$ )	B5 (1,55 - 1,75 $\mu\text{m}$ )	B7 (2,08 - 2,35 $\mu\text{m}$ )
Landsat 8-OLI	Bleu	Vert	Rouge
	B2 (0,45 - 0,51 $\mu\text{m}$ )	B3 (0,53 - 0,59 $\mu\text{m}$ )	B4 (0,64 - 0,67 $\mu\text{m}$ )
	Proche Infrarouge	Infrarouge onde courte	Infrarouge onde courte 2
	B5 (0,85 - 0,88 $\mu\text{m}$ )	B6 (1,57 - 1,65 $\mu\text{m}$ )	B7 (2,11 - 2,29 $\mu\text{m}$ )
Sentinel 2-MSI S2A	Bleu	Vert	Rouge
	B2 (0,44 - 0,54 $\mu\text{m}$ )	B3 (0,53 - 0,58 $\mu\text{m}$ )	B4 (0,64 - 0,68 $\mu\text{m}$ )
	Proche Infrarouge	Infrarouge onde courte	Infrarouge onde courte 2
	B8 (0,76 - 0,90 $\mu\text{m}$ )	B11 (1,54 - 1,68 $\mu\text{m}$ )	B12 (2,08-2,32 $\mu\text{m}$ )

#### 4.3.4 Sélection des sites d'entraînement et de validation

Des cellules de 15 km<sup>2</sup> ont été ajoutées au territoire étudié. Pour chaque cellule, un minimum de 3 zones d'entraînement et de 3 zones de validation par classe a été sélectionné sur les images Sentinel 2-MSI S2A, lorsque possible. L'objectif était de bien répartir les différents échantillons de pixel pour chaque classe sur le territoire. Le nombre d'échantillons par cellule peut varier lorsque certaines classes n'étaient pas retrouvées dans certaines cellules. Une couche vectorielle pour les zones d'entraînement et une pour les zones de validation ont été produites, le nombre total de polygones ainsi que de pixels pour chaque couche et classe est disponible au tableau 4.5. Lorsque toutes les zones ont été sélectionnées, les couches ont été importées sur le logiciel ENVI afin d'être transformées en ROI. Les statistiques de séparabilité ont été produites pour les deux types de zones.

Tableau 4.5 Nombre de sites et de pixels pour les zones d'entraînement et de validation pour la classification de 2011 et la classification de 2017

Zones	Classes	Classification de 2011		Classification de 2017	
		Nombre de site	Nombre de pixels	Nombre de site	Nombre de pixels
Entraînement	Conifère	55	1196	51	395
	Mixte	49	1279	49	430
	Tourbière avec mousse	56	972	50	616
	Tourbière avec arbuste	49	1037	47	451
	Sol nu/feu	-	-	52	355
	Total	209	4484	249	2247
	Pourcentage global de pixel	60,32		54,59	
Validation	Conifère	53	919	49	336
	Mixte	47	703	48	383
	Tourbière avec mousse	50	635	49	370
	Tourbière avec arbuste	46	693	48	315
	Sol nu/feu	-	-	50	465
	Total	196	2950	244	1869
	Pourcentage global de pixel	39,68		45,41	

#### 4.3.5 Classification de l'image Landsat 8-OLI de 2017

Par la suite, une classification employant la méthode *Maximum Likelyhood* a été effectuée sur l'image Landsat 8-OLI en utilisant les zones d'entraînement. Afin de vérifier les résultats obtenus, une matrice de confusion basée sur les pixels employant les zones de validation a été calculée.

#### 4.3.6 Re-classification de l'image Landsat 5-TM de 2011

Une nouvelle classification a été produite sur l'image de 2011 de limiter la variabilité pouvant être liées à la perception de l'opérateur. Des sites d'entraînements et de validations ont été délimités directement sur l'image à classifier, en utilisant la même technique que pour la classification de 2017 expliquée plus haut. Il n'a pas été possible d'utiliser des images Sentinel 2-MSI S2A pour l'entraînement et la validation de cette classification, car le satellite n'était pas encore en service (ESA, 2018c). Cette nouvelle classification de 2011 a donc été utilisée afin de comparer l'évolution de la végétation entre 2011 et 2017.

#### 4.3.7 Comparaison temporelle

Afin d'effectuer une comparaison temporelle, des valeurs ont été attribuées aux pixels selon le tableau 4.6.

Tableau 4.6 Valeurs attribuées aux pixels des couches matricielles selon l'année de la classification et la classe

Classes	2011	2017
<i>Conifère</i>	10	1
<i>Mixte</i>	20	2
<i>Tourbière avec mousse</i>	30	3
<i>Tourbière avec arbuste</i>	40	4
<i>Sol nu/feu</i>	-	5

La technique de comparaison s'inspire de Dieye et al., (2013). Les valeurs des pixels de la première classification sont des multiples de 10 et les valeurs des pixels de la deuxième classification sont des chiffres liés aux dizaines de chaque classe de la première classification. En additionnant les deux couches matricielles, il est alors possible d'observer s'il y a une modification dans la classe attribuée aux pixels. Par exemple, un pixel équivalent à 11 a été classifié comme une forêt de conifères pour les deux classifications, tandis qu'un pixel dont la somme est de 25 est un pixel qui était classifié comme *Mixte* et qui est maintenant *Sol nu/feu*.

Par la suite, il a été possible d'acquérir la superficie en multipliant la résolution des pixels par la somme de pixel pour chaque catégorie.

#### 4.4 Indice de qualité de l'habitat

##### 4.4.1 Choix de l'indice

Puisque l'espèce du caribou est composée de plusieurs sous-espèces et populations, plusieurs IQH ont été développés afin d'être applicables aux régions étudiées ainsi qu'aux caractéristiques et préférences de l'animal étudié (Leblond et al., 2014b). En ce qui concerne le caribou boréal dans les Territoires du Nord-Ouest, aucun IQH ne semble disponible. Afin d'en trouver un applicable à la population du caribou boréal dans cette région, une recherche dans la littérature a été effectuée ciblant la population boréale à travers le Canada. Suite à la recherche, un seul IQH adapté à la population a été trouvé. Il a été développé par Leblond et al., (2014a). L'IQH a été créé spécifiquement pour le caribou boréal dans la province du Québec et a comme but d'assister les différents agents de la faune à assurer une conciliation de la conservation du territoire pour le caribou

boréal et une gestion durable des ressources naturelles. Les auteurs ont fait appel à l'avis de 14 experts concernant les échelles spatiales et temporelles d'utilisation de l'IQH, les zones d'influence des infrastructures humaines, la hiérarchie des variables d'habitat et le nombre de variables devant être incluses dans le modèle. L'IQH a été validé à l'aide de données télémétriques provenant de colliers GPS de 45 caribous (Leblond et al., 2014b).

#### 4.4.2 Présentation de l'IQH

L'IQH qui a été développé est présenté à l'équation 1. Des poids relatifs ont été attribués aux variables de l'habitat par les auteurs à partir de l'analyse hiérarchique des avis des experts (Leblond et al., 2014b).

$$IQH = [(0,55 \times \text{Catégories d'habitat}) \times \text{Distance route} \times \text{Distance chemin} \times \text{Distance mine}] - (0,45 \times \text{Infrastructures humaines}) \quad (1)$$

Les calculs composant les différentes catégories de l'IQH sont présentés dans les équations ci-dessous. Les variables composant l'équation 2 sont calculées en superficie.

$$\begin{aligned} \text{Catégories d'habitat} &= (0,25 \times \text{Conifères matures de } > 70 \text{ ans}) \\ &+ (0,19 \times \text{Conifères matures de } > 50 \text{ ans} \leq 70 \text{ ans}) \\ &+ (0,14 \times \text{Milieux humides}) + (0,22 \times \text{Milieux riches en lichens}) \\ &+ (0,06 \times \text{Perturbations naturelles de } \leq 20 \text{ ans}) \\ &+ (0,04 \times \text{Coupes forestières de } \leq 5 \text{ ans}) \\ &+ (0,06 \times \text{Milieux en régénération}) \end{aligned} \quad (2)$$

L'équation 3 présente les Routes asphaltées et les Chemins forestiers de l'équation 3, c'est la densité (km/km<sup>2</sup>) qui est utilisée. Pour la variable Mines, c'est le nombre d'installations présentes.

$$\begin{aligned} \text{Infrastructures humaines} &= (0,35 \times \text{Routes asphaltées}) + (0,30 \times \text{Chemins forestiers}) + (0,35 \times \text{Mines}) \end{aligned} \quad (3)$$

Finalement, la qualité résiduelle de l'habitat lié la distance à une infrastructure (équation 4, 5 et 6) est aussi employée dans l'IQH avec la variable  $x$  qui est la distance entre la

zone évaluée et l'élément ciblé, jusqu'à un maximum de 5 000 m (Leblond et al., 2014 b).

$$\text{Distance route} = -0,000003x^2 + 0,0343x + 8,2524 \quad (4)$$

$$\text{Distance chemin} = -0,000000002x^3 + 0,00002x^2 + 0,0632x + 21,886 \quad (5)$$

$$\text{Distance mine} = -0,000002x^2 + 0,0279x + 5,9313 \quad (6)$$

Des modifications à l'équation 2 ont été nécessaires afin de pouvoir appliquer l'IQH au territoire étudié. Certaines informations pour les valeurs de l'habitat de l'équation ne sont pas disponibles. L'équation 7 est le résultat des modifications apportées à l'équation 2.

$$\text{Catégories d'habitat} \quad (7)$$

$$= (0,42 \times \text{Conifères} > 50 \text{ ans}) + (0,27 \times \text{Milieux humides}) + (0,11 \times \text{Perturbations naturelles} \leq 20 \text{ ans}) + (0,08 \times \text{Bandes défrichées} \leq 35 \text{ ans}) + (0,12 \times \text{Milieux en régénération})$$

La valeur d'habitat *Conifères > 50 ans* est la moyenne des valeurs *Conifères > 50 ans* et *Conifère > 50 ans ≤ 70 ans* de l'équation 2. Cette combinaison a été effectuée, car l'information sur l'âge des forêts de conifères n'est pas disponible. Toutefois, il est possible d'effectuer une estimation des forêts en excluant les forêts touchées par des zones perturbées. Il y a aussi la valeur d'habitat *Bandes défrichées ≤ 35 ans* qui remplace les valeurs *Coupes forestières de > 5 ans* et *Coupes forestières de > 5 à ≤ 20 ans*. Cette modification est liée au fait qu'il n'y avait pas d'informations disponibles pour ces valeurs pour le territoire étudié. La valeur d'habitat qui les remplace utilise les données de la couche vectorielle de CanVec liée aux percées produites par des levés cadastraux ou sismiques (Ressources naturelles Canada, 2017a). La période couverte par la valeur *bandes défrichées* a été étendue jusqu'à 35 ans puisqu'il a été possible d'observer les vestiges des percées des années 1980 sur les images Sentinel 2-MSI S2A. Il a été aussi constaté dans une étude que généralement la régénération significative de la végétation ligneuse dans une ligne de sondage sismique peut ne pas être visible même après 35 ans (Lee and Boutin, 2005). Finalement, la valeur d'habitat *milieux riches en lichens* qui fait référence aux landes à lichen, a été enlevée puisque cette classe de végétation n'est pas

retrouvée dans la classification de 2017. Afin de garder l'importance relative des valeurs d'habitat, les pondérations ont été recalculées avec une règle de trois pour avoir un total de 1.

#### **4.4.3 Application de l'IQH**

Le schéma présenté à la figure 4.5 illustre les étapes principales pour appliquer l'IQH au territoire étudié.

La première étape de l'application de l'IQH a été le prétraitement des données utilisées pour les variables d'habitat. Le tableau 4.7 résume les différentes manipulations.

Par la suite, une grille de cellules de 100 m par 100 m couvrant le territoire étudié a été créée. Puisque les valeurs des catégories d'habitat sont calculées à partir d'un contexte paysager circulaire de 1 km de rayon, une zone tampon de 1,5 km a été produite autour de la couche vectorielle du territoire étudié afin que les cellules se retrouvant sur la limite du territoire puissent avoir des données pour leurs contextes paysagers.



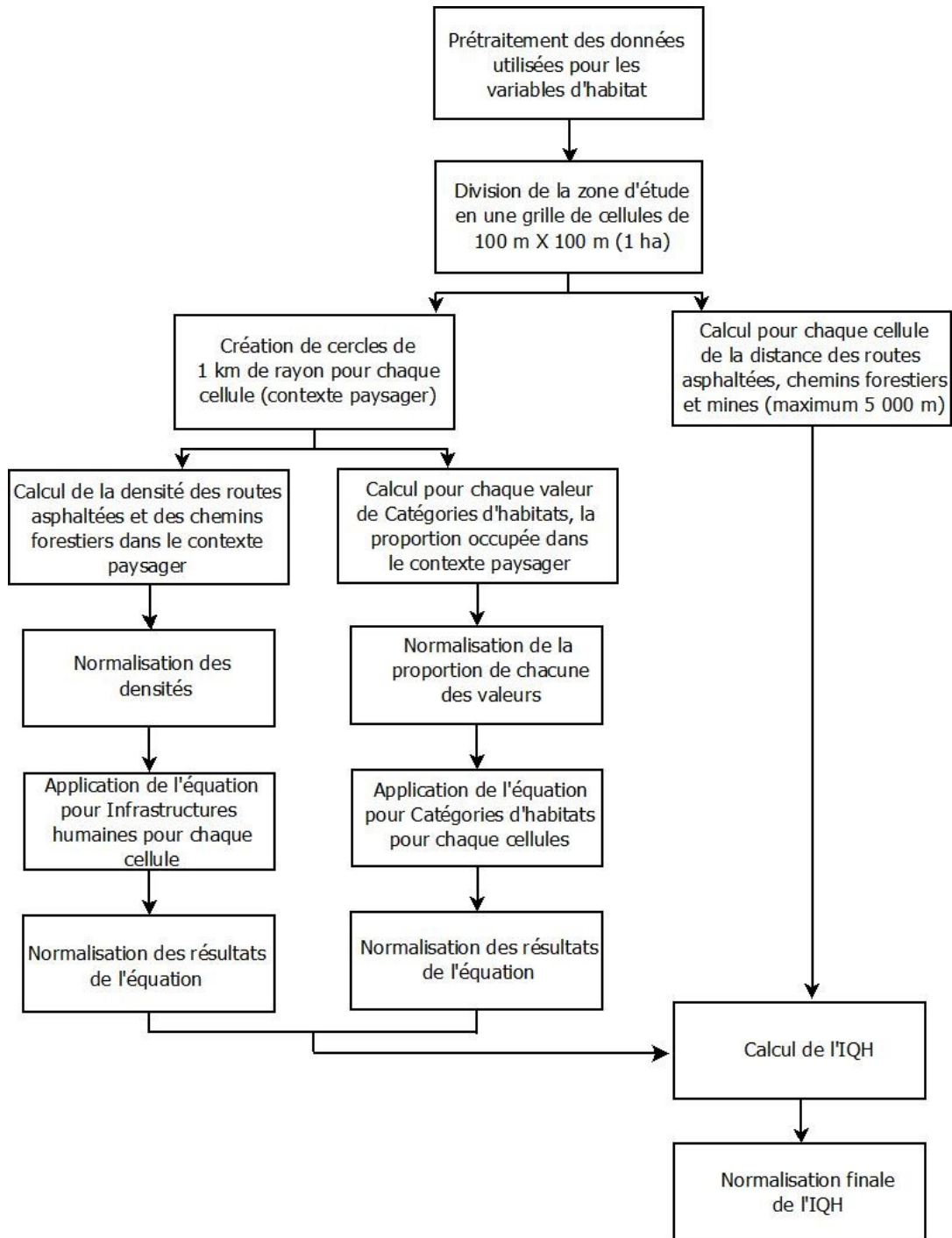


Figure 4.5 Méthodologie pour l'application de l'IQH (Inspirée de Leblond et al., 2014b)

Tableau 4.7 Manipulations effectuées pour les prétraitements nécessaires pour les variables d'habitat

	Couches vectorielles utilisées	Traitements effectués
Conifères > 50 ans	Couche vectorielle de la classification 2017	Sélection de la classe "Conifère"
	Couche vectorielle des feux de forêts (Sélection des années 1967 à 2016)	Exclusion des polygones "Conifères" touchés par les feux
	Couche vectorielle des percées (Sélection des années 1967 à 2016)	Exclusion des polygones "Conifères" touchés par les percées
Milieux humides	Couche vectorielle de la classification 2017	Sélection des classes "Tourbière avec mousse" et "Tourbière avec arbuste"
	Couche vectorielle des feux de forêts (Sélection des années 1967 à 2016)	Exclusion des polygones "Milieux humides" touchés par les feux
	Couche vectorielle des percées (Sélection des années 1967 à 2016)	Exclusion des polygones "Milieux humides" touchés par les feux
Perturbations naturelles ≤ 20 ans	Couche vectorielle des feux de forêts	Sélection des années 1997 à 2017
Bandes défrichées ≤ 35 ans	Couche vectorielle des bandes défrichées	Zone tampon de 10 mètres
		Sélection des années 1983 à 2017
Milieux en régénération	Couche vectorielle des bandes défrichées	Sélection des années 1967 à 1982
	Couche vectorielle des feux de forêts	Sélection des années 1967 à 1997
	Combinaison des deux couches vectorielle traitées	

Afin de connaître la proportion occupée par les valeurs de *Catégories d'habitats* dans le contexte paysager de chaque cellule, plusieurs manipulations ont été nécessaires sur ArcMap. Ces manipulations ont été effectuées pour chacune des variables indépendamment. Tout d'abord une nouvelle couche vectorielle a été produite à partir de l'intersection entre la couche vectorielle de la grille et celle de la variable et un nouveau champ a été ajouté afin d'y calculer l'aire occupée en mètre carré de la variable. Ensuite, la couche vectorielle de l'intersection a été jointe à la couche vectorielle de la grille grâce aux identifiants uniques de chaque cellule de la grille. Par la suite, la couche vectorielle de la grille a été transformée en couche matricielle en attribuant aux pixels les valeurs retrouvées dans le champ de la superficie. Pour chaque cellule de la couche matricielle produite, une somme des pixels, soit la somme de l'aire, dans un contexte paysager de 1000 m de rayon a été calculée. Le résultat a été par la suite découpé à la zone d'étude pour éliminer les résultats des cellules se trouvant dans la zone tampon. Par la suite, le

pourcentage d'occupation du contexte de territoire pour chaque valeur a été calculé. Finalement, les valeurs ont été normalisées en utilisant l'équation 8,  $X_i$  étant la valeur du pixel et  $X_j$  est l'ensemble des valeurs possibles pour cette variable d'habitat.

$$SX_i = (X_i - \min X_j) / (\max X_j - \min X_j) \quad (8)$$

Il a été possible ensuite de combiner les couches matricielles des variables de *Catégories d'habitat* avec l'équation 7. Les résultats obtenus ont aussi été normalisés avant d'être insérés dans le calcul final (équation 1).

Pour le groupe *Infrastructures humaines*, les entités des couches vectorielles des segments routiers et des sentiers de CanVec ont été respectivement agrégées. Par la suite, les mêmes étapes que pour les variables de *Catégories d'habitat* ont été effectuées afin d'acquérir la longueur des segments par cellule. Des couches matricielles ont été produites avec cette information et la somme des pixels dans un contexte paysager de 1000 m a été calculée pour chaque cellule. Ensuite, il a été possible d'obtenir la densité des variables en divisant la longueur totale pour chacune des variables par la superficie du contexte de territoire (Leblond et al., 2014b). Les résultats ont été normalisés avant d'être employés dans l'équation 3 et une fois de plus après avant d'être insérés dans l'équation de l'IQH finale (équation 1).

Par la suite, afin d'acquérir les données nécessaires pour les équations 4,5 et 6, il a été nécessaire de calculer les distances entre les cellules et les routes, segment routier, ainsi que les chemins forestiers. Les valeurs plus élevées que 5 000 mètres dans le champ résultant de la manipulation ont été modifiés à 5 000 mètres (Leblond et al., 2014b). Par la suite, une couche matricielle a été produite pour les deux variables avec les valeurs obtenues pour la distance comme valeur de pixel. Finalement, l'équation 4 a été appliquée à la couche matricielle avec les valeurs liées à la distance aux routes et l'équation 5 pour la couche matricielle avec les valeurs liées aux distances avec les sentiers. Pour l'équation 6, puisqu'il n'y a pas de mines dans le secteur et que l'ajout de l'équation n'apporte aucune variabilité au résultat final normalisé, elle n'a pas été ajoutée.

Finalement, l'équation 1 a été appliquée en utilisant les couches matricielles des *Catégories d'habitat* et *Infrastructures humaines* normalisées ainsi que les résultats des équations de distance aux infrastructures. Le résultat final a été normalisé afin d'avoir des valeurs entre 0 et 1 (Leblond et al., 2014b).

## 5 RÉSULTATS

Cette section présente les résultats de la classification de la végétation pour l'année 2011 et 2017 ainsi que l'analyse spatiotemporelle effectuée à partir de la comparaison de ces deux classifications. Les observations des changements sont présentées par classe d'occupation du sol : *Conifère*, *Mixte*, *Tourbière avec mousse* et *Tourbière avec arbuste*. La deuxième partie des résultats concerne l'application de l'IQH pour le caribou boréal sur le territoire étudié.

### 5.1 Cartographie de la végétation de la zone étudiée

Les rapports de séparabilité pour les zones d'entraînement et de validation utilisées pour les classifications de l'image de Landsat 5-TM du 27 août 2011 et l'image de Landsat 8-OLI du 8 août 2017 sont disponibles au tableau 5.1.

Les valeurs des indices de Jeffries-Matusita et du *Transformed Divergence* sont près de ou plus de 1.9 pour l'ensemble des paires de classes. Plus la valeur se rapproche de 2, plus la séparabilité des classes est optimale. La combinaison *Tourbière avec mousse* et *Tourbière avec arbuste* est celle avec les indices de séparabilité les plus bas pour 2011 et 2017, toutefois les valeurs sont très proches du seuil de 1,9 qui équivaut à une bonne séparabilité (PCI Geomatics, 2017).

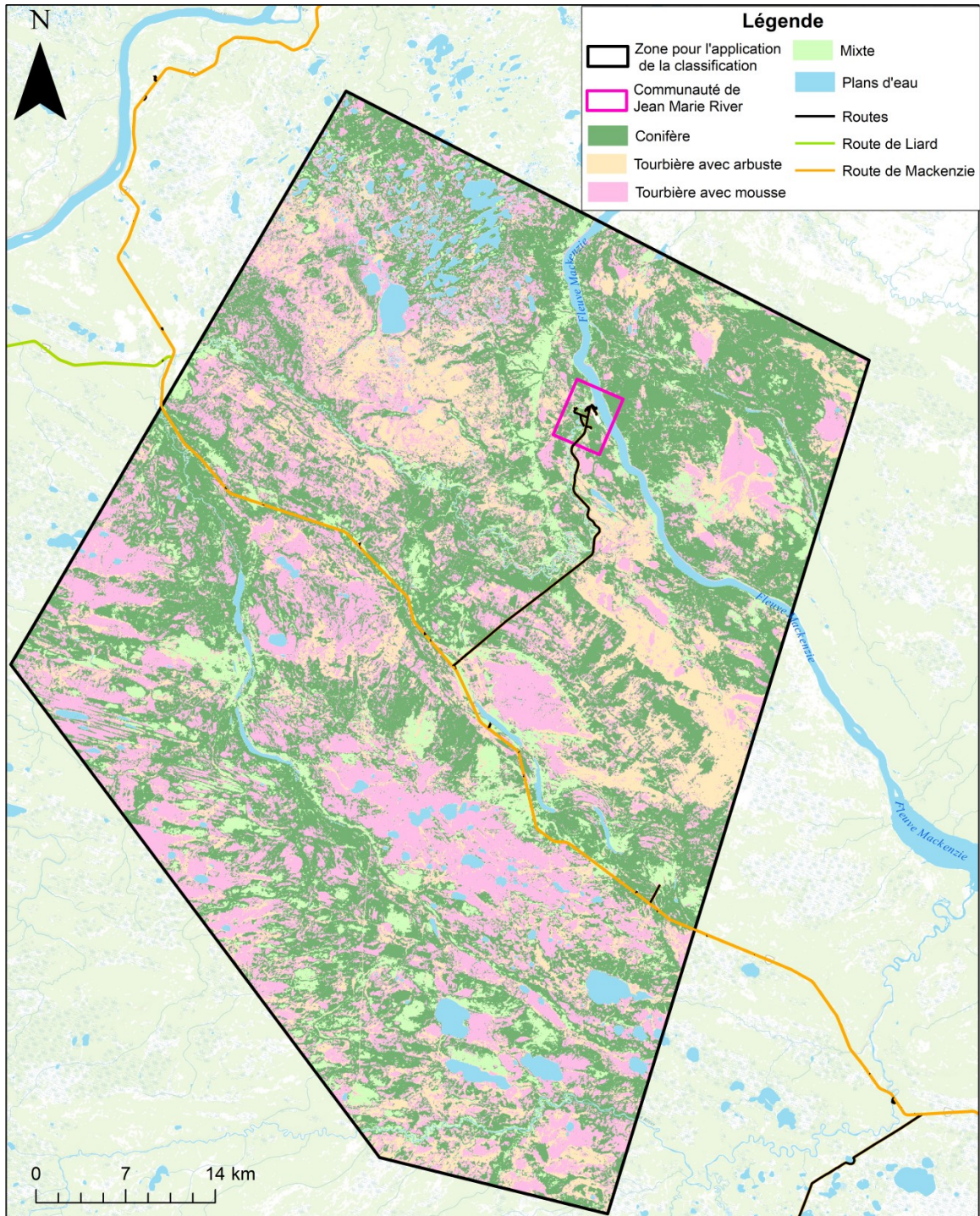
*Tableau 5.1 Rapport de séparabilité pour les zones d'entraînement et de validation utilisées pour la classification de 2011 et de 2017*

		Séparation des paires (Ordre croissant)		Jeffries-Matusita	Transformed Divergence
2011	Zones d'entraînement	Tourbière avec mousse	Tourbière avec arbuste	1.88	1.99
		Mixte	Tourbière avec mousse	1.99	1.99
		Conifère	Tourbière avec mousse	1.99	2
		Conifère	Mixte	1.99	1.99
		Conifère	Tourbière avec arbuste	1.99	1.99
		Mixte	Tourbière avec arbuste	1.99	1.99
	Zones de validation	Tourbière avec mousse	Tourbière avec arbuste	1.86	1.99
		Mixte	Tourbière avec mousse	1.99	1.99
		Conifère	Mixte	1.99	1.99
		Conifère	Tourbière avec mousse	1.99	2
		Mixte	Tourbière avec arbuste	1.99	1.99
		Conifère	Tourbière avec arbuste	1.99	1.99
2017	Zones d'entraînement	Tourbière avec mousse	Tourbière avec arbuste	1.92	2
		Tourbière avec mousse	Sol nu/feu	1.97	2
		Conifère	Sol nu/feu	1.99	2
		Mixte	Tourbière avec arbuste	1.99	2
		Tourbière avec mousse	Conifère	1.99	2
		Tourbière avec arbuste	Sol nu/feu	1.99	2
		Tourbière avec mousse	Mixte	1.99	2
		Conifère	Tourbière avec arbuste	1.99	1.99
		Conifère	Mixte	1.99	2
		Mixte	Sol nu/feu	1.99	2
	Zones de validation	Tourbière avec arbuste	Tourbière avec mousse	1.91	1.99
		Conifère	Sol nu/feu	1.96	1.99
		Mixte	Tourbière avec arbuste	1.97	2
		Sol nu/feu	Tourbière avec mousse	1.98	1.99
		Mixte	Tourbière avec mousse	1.99	1.99
		Tourbière avec arbuste	Sol nu/feu	1.99	1.99
		Conifère	Tourbière avec mousse	1.99	2
		Conifère	Mixte	1.99	1.99
		Conifère	Tourbière avec arbuste	1.99	1.99
		Mixte	Sol nu/feu	1.99	1.99

### 5.1.1 Cartographie de la végétation pour l'année 2011

La carte de la classification effectuée à partir de l'image de Landsat 5-TM du 27 août 2011 est disponible à la figure 5.1.





Service Layer Credits: Sources: Esri, HERE, DeLorme, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, MapmyIndia, © OpenStreetMap

Carte réalisée par Alexandra Lavoie,  
Université de Sherbrooke, Sherbrooke  
26 avril 2018  
Données utilisées :  
Calmels et al., 2014a; U.S. Department of the Interior, 2018a.

Figure 5.1 Carte de la classification de l'année 2011

Les zones classifiées comme *Conifère* sont retrouvées sur l'ensemble du territoire. La classe *Tourbière avec arbuste* est principalement retrouvée au nord de la route de Mackenzie. Au sud du territoire, on retrouve beaucoup de *Tourbière avec mousse*. En ce qui concerne la classe *Mixte*, elle est souvent retrouvée entourée de la classe *Conifère*.

La superficie du territoire occupée par chaque classe est présentée au tableau 5.2. La classe *Conifère* occupe une plus grande superficie que toutes les autres classes en 2011, soit 10 % de plus que la deuxième classe en importance, *Tourbière avec mousse*.

Tableau 5.2 Superficie occupée par chacune des classes pour la classification de 2011

	Année 2011	
	Superficie (km <sup>2</sup> )	Pourcentage
Conifère	1466,78	43,24
Mixte	340,25	10,03
Tourbière avec mousse	1081,92	31,89
Tourbière avec arbuste	503,30	14,84
Total	3392,26	100,00

La matrice de confusion produite pour la classification de 2011 est disponible au tableau 5.3. Les résultats sont caractérisés par une précision globale de 99,52 % avec un coefficient de Kappa de 0,99. Les zones de validation de *Conifère* et *Tourbière avec mousse* sont marquées par une exactitude de 100 % dans la classification de leurs pixels. La classification des zones de validation pour la classe *Mixte* a une exactitude de 99,29 % avec 2 pixels attribués aux classes *Conifère* et *Tourbière avec arbuste* et 1 pixel à la classe *Tourbière avec mousse*. La classification des zones de validation la *Tourbière avec mousse* est caractérisée par une exactitude de 98,72 % avec 9 pixels qui ont été classés comme *Tourbière avec arbuste*.

Tableau 5.3 Matrice de confusion pour la classification de 2011

Classes	Zones de validation (Pixels)				Total	%
	Conifère	Mixte	Tourbière avec arbuste	Tourbière avec mousse		
Conifère	917	2	0	0	919	99,78
Mixte	0	703	0	0	703	100,00
Tourbière avec arbuste	0	2	624	9	635	98,27
Tourbière avec mousse	0	1	0	692	693	99,86
Total	917	708	624	701	Précision Globale	
					0,99	
%	100,00	99,29	100,00	98,72	Coefficient de Kappa	
					0,99	

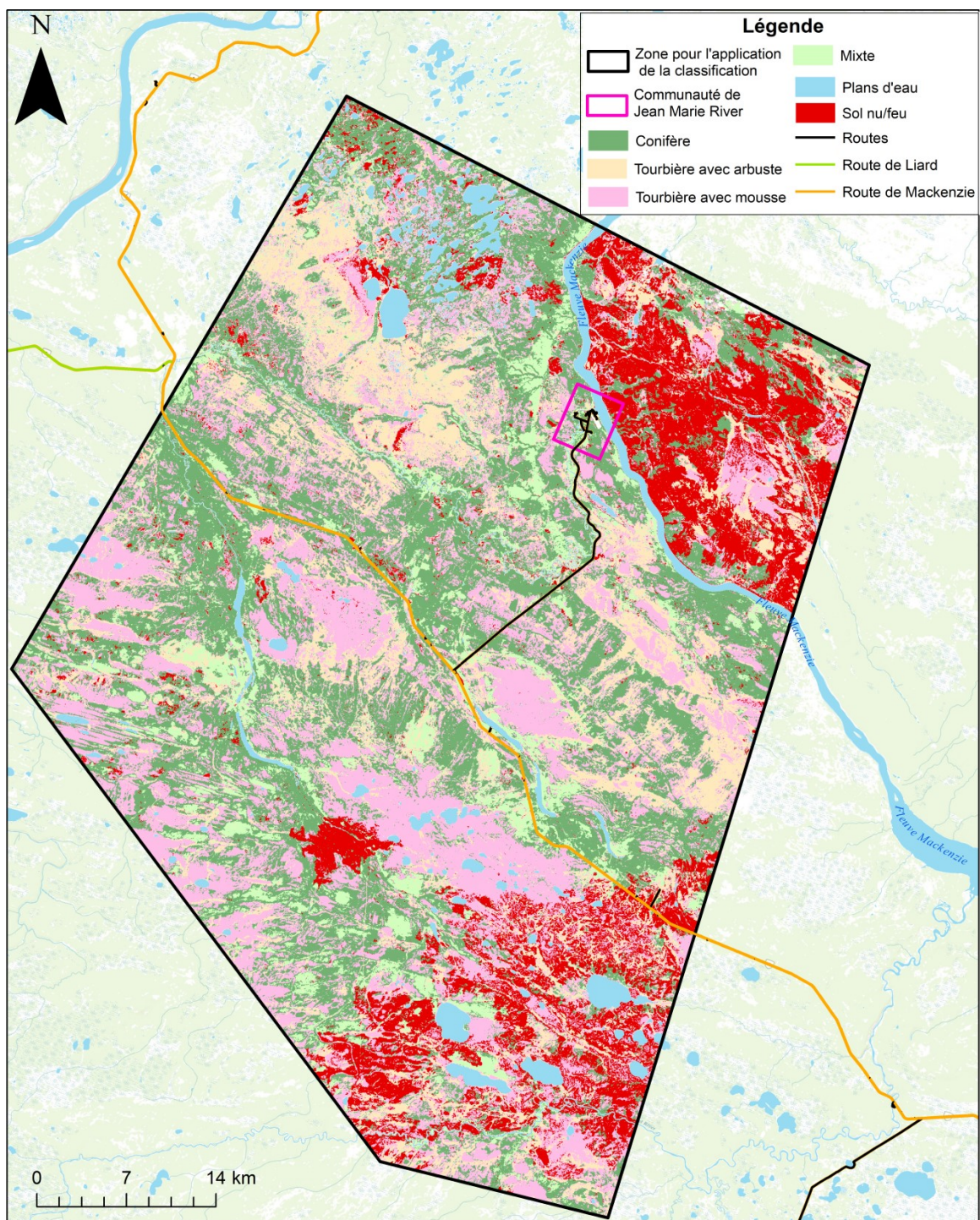
### 5.1.2 Cartographie de la végétation pour l'année 2017

Le résultat de la classification de l'image de Landsat 8-OLI, pour la date du 8 août 2017, est présenté à la figure 5.2 et la superficie occupée par chacune des classes est disponible au tableau 5.4.

Les zones caractérisées par les classes *Conifère* et *Tourbière avec mousse* sont les plus présentes sur le territoire étudié. Le territoire occupé par la classe *Conifère* est étendu sur la zone d'étude entre les diverses autres classes alors que les zones classifiées comme *Tourbière avec mousse* sont plus concentrées. En ce qui concerne la classe *Tourbière avec arbuste*, elle est surtout retrouvée au nord de la route de Mackenzie qui sépare la zone d'étude en deux.

La classe *sol nu/feu* occupe une superficie importante au nord-est ainsi qu'au sud-est du territoire. Ces zones ont été touchées par des feux de forêt en 2014 et 2013 respectivement (Northwest Territories Centre for Geomatics, 2018). La classification permet aussi de situer un feu qui a eu lieu en 2016 sur une moins grande superficie au sud de la route de Mackenzie (Northwest Territories Centre for Geomatics, 2018). D'autres zones touchées par des feux de plus petite envergure dans la période de 2011 à 2016 sont observables (Northwest Territories Centre for Geomatics, 2018). La classe couvre aussi de petites régions où il n'y a pas eu de feu répertorié.





Service Layer Credits: Sources: Esri, HERE, DeLorme, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, MapmyIndia, © OpenStreetMap

Carte réalisée par Alexandra Lavoie,  
Université de Sherbrooke, Sherbrooke  
26 avril 2018  
Données utilisées :  
Calmels et al., 2014a; U.S. Department of the Interior, 2018a.

Figure 5.2 Carte de la classification pour l'année 2017

Tableau 5.4 Superficie occupée par chacune des classes pour la classification de 2017

	Année 2017	
	Superficie (km <sup>2</sup> )	Pourcentage
Conifère	1074,17	31,67
Mixte	303,41	8,94
Tourbière avec mousse	1064,63	31,38
Tourbière avec arbuste	487,50	14,37
Sols nu/feu	462,54	13,64
Total	3392,26	100,00

Le résultat de la validation de la classification effectuée avec les zones de validation, la matrice de confusion, est présenté au tableau 5.5. Les données sont présentées en pourcentage et la précision globale de la classification a été évaluée à 97,11 % avec un coefficient de Kappa de 0,96. La classe *Conifère* est la seule dont tous les pixels ont été classifiés dans la classe prédite équivalente. Pour la classe *Mixte*, il y a 14 pixels qui ont été classifiés comme *Tourbière avec arbuste* et seulement 2 pixels comme *Tourbière avec mousse*, le reste des pixels des zones de validation sont dans *Mixte*. Quelques pixels des zones de validation pour la classe *Tourbière avec arbuste* ont été classifiés comme *Tourbière avec mousse* et *Non classifiée* qui équivaut aux zones où les masques des nuages et des routes ont été appliqués. Cette erreur est dû au fait que les masques retrouvés sur l'image Landsat 8-OLI, ne sont pas appliqués aux images Sentinel 2-MSI S2A, qui sont utilisées pour la sélection des zones de validation. Ainsi, il y a des zones de validation sélectionnées sur Sentinel 2-MSI S2A qui, lorsqu'appliquées à l'image Landsat 8-OLI, se retrouvaient à l'intérieur des masques pour les nuages ou les routes. La classe *Tourbière avec mousse* aussi est touchée par cette erreur avec 4 pixels classés comme *Non classifié*. Quelques pixels de *Tourbière avec mousse* ont été classifiés dans les classes *Conifère*, *Mixte* et *Tourbière avec arbuste*, mais aucune dans *Sol nu/feu*. Pour la classe *Sol nu/feu*, 1 pixel a été classifié comme *Conifère* et 4 comme *Tourbière avec mousse*.

Tableau 5.5 Matrice de confusion pour la classification de 2017

Classes	Zones de validation (Pixels)					Total	%
	Conifère	Mixte	Tourbière avec arbuste	Sol nu / feu	Tourbière avec mousse		
Conifère	336	0	0	1	2	339	99,12
Mixte	0	367	0	0	5	372	98,66
Tourbière avec arbuste	0	14	355	0	7	376	94,41
Sol nu / feu	0	0	0	310	0	310	100,00
Tourbière avec mousse	0	2	12	4	447	465	96,13
Non classifiée	0	0	3	0	4	7	0,00
Total	336	383	370	315	465	Précision Globale	
							0,97
%	100,00	95,82	95,95	98,41	96,13	Coefficient de Kappa	
							0,96

## 5.2 Analyse spatiotemporelle de la végétation de la zone étudiée

Les résultats de l'analyse spatiotemporelle comprennent une matrice de comparaison ainsi que des cartes illustrant l'évolution de chacune des classes. La matrice de comparaison de la superficie des classes de 2011 à 2017 est disponible au tableau 5.6. On retrouve à l'avant-dernière colonne le pourcentage de la superficie retrouvée dans les mêmes classes en 2011 et en 2017. Ce pourcentage est plus élevé si on exclut la classe *Sol nu/feu* comme on peut le voir à la dernière colonne à droite, principalement pour la classe *Conifère*. La dernière ligne du tableau représente le pourcentage de la superficie des classes de 2017 qui provient d'un changement de classe. La classe *Conifère* en 2017 est celle dont le pourcentage de sa superficie provient le moins d'un changement de classe. Les autres classes se retrouvent aux alentours de 30 %.

Tableau 5.6 Comparaison spatiotemporelle de la superficie (km<sup>2</sup>) entre les classes de 2011 et 2017

		Superficie (km <sup>2</sup> ) des classes pour 2017					% même classe	% même classe (Sans "Sol nu/feu")
		Conifère	Mixte	Tourbière avec mousse	Tourbière avec arbuste	Sol nu/feu		
Superficie (km <sup>2</sup> ) des classes pour 2011	Conifère	967,26	51,95	138,34	19,20	290,03	65,94	82,20
	Mixte	36,66	203,16	31,54	35,76	33,13	59,71	66,15
	Tourbière avec mousse	67,23	40,75	750,61	111,22	112,12	69,38	77,40
	Tourbière avec arbuste	3,02	7,55	144,14	321,32	27,26	63,84	67,50
% de la superficie de la classe de 2017 qui provient d'un changement de classe		9,95	33,04	29,50	33,07			



### 5.2.1 Cartographie de l'évolution de la classe *Conifère*

La figure 5.3 présente la cartographie de l'évolution spatiotemporelle des zones caractérisées par la classe *Conifère*. La cartographie se limite à la classe *Conifère* présente en 2011 et les différentes couleurs indiquent ce qu'elle est devenue en 2017. Le tableau 5.7 expose le pourcentage de la superficie retrouvée dans chaque classe après comparaison.

La classe *Sol nu/feu* représente le plus grand changement de superficie pour les forêts de conifères avec 19,77 % de superficie modifiée, ce qui est le plus grand changement attribué au *Sol nu/feu* parmi toutes les classes. Les zones les plus touchées par ces modifications sont retrouvées au sud-est du territoire étudié, au nord-est du fleuve Mackenzie ainsi qu'au sud de la route de Mackenzie, endroits qui ont été touchés par des feux de forêt entre 2013 et 2016.

*Tableau 5.7 Superficie du territoire occupé par les classes de 2017 issues de la classe Conifère de 2011*

Conifère en 2011	
Classe en 2017	Pourcentage de la superficie
Conifère	65,94
Mixte	3,54
Tourbière avec mousse	9,43
Tourbière avec arbuste	1,31
Sol nu/feu	19,77
Total	100,00

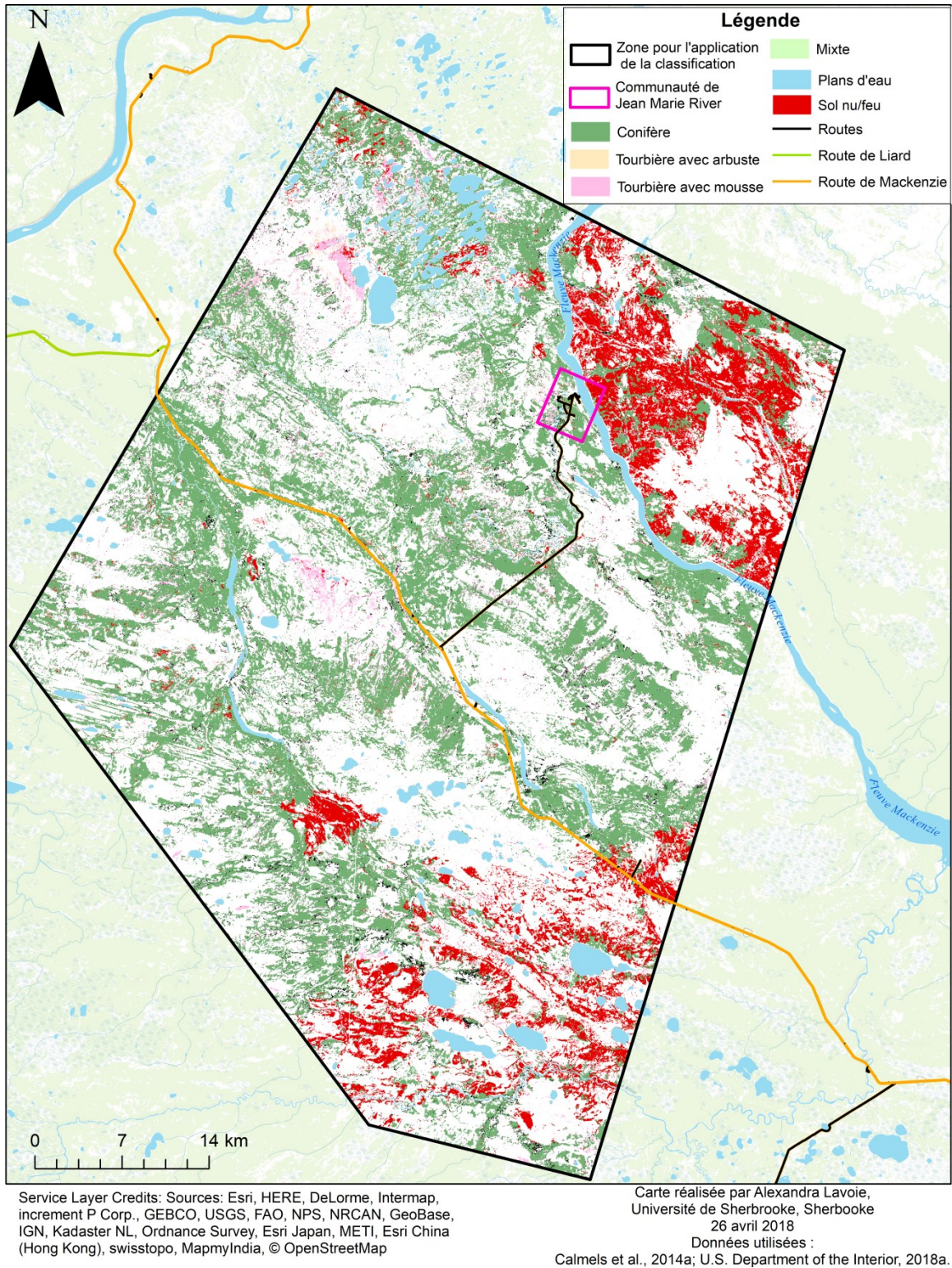


Figure 5.3 Classes de 2017 occupées par la classe Conifère de 2011 (Seul le territoire classifié comme Conifère en 2011 est cartographié)

La deuxième transition la plus importante de 2011 à 2017 est vers la classe *Tourbière avec mousse* qui modifie 9,54 % de la superficie de la classe *Conifère*. Le changement de classe est particulièrement visible au nord-ouest du territoire étudié ainsi qu'au sud de la route de Mackenzie, à l'ouest de l'embranchement reliant la communauté de Jean Marie River à la route. Ces zones sont représentées à la figure 5.4 avec des composés fausses-couleur utilisant les bandes spectrales équivalentes entre Landsat 5-TM et Landsat 8-OLI. À la zone A, on observe un changement de classe vers *Tourbière avec mousse* près des cours d'eau, les pixels qui sont d'une couleur violet foncé en 2011 deviennent plus pâle avec des teintes de turquoise. Pour la zone B, la même transition vers la classe *Tourbière avec mousse* est retrouvée. Les pixels sur l'image Landsat 5-TM sont beaucoup plus foncés que ceux retrouvés sur l'image de 2017.

Seulement 1,31 % de la superficie de la classe *Conifère* est classifiée comme *Tourbière avec arbuste* et l'endroit où le phénomène est le plus visible est dans la zone A de la figure 4.4. Pour la classe *Mixte*, les modifications sont souvent retrouvées aux limites de zones hétérogènes classifiées comme *Conifère*.



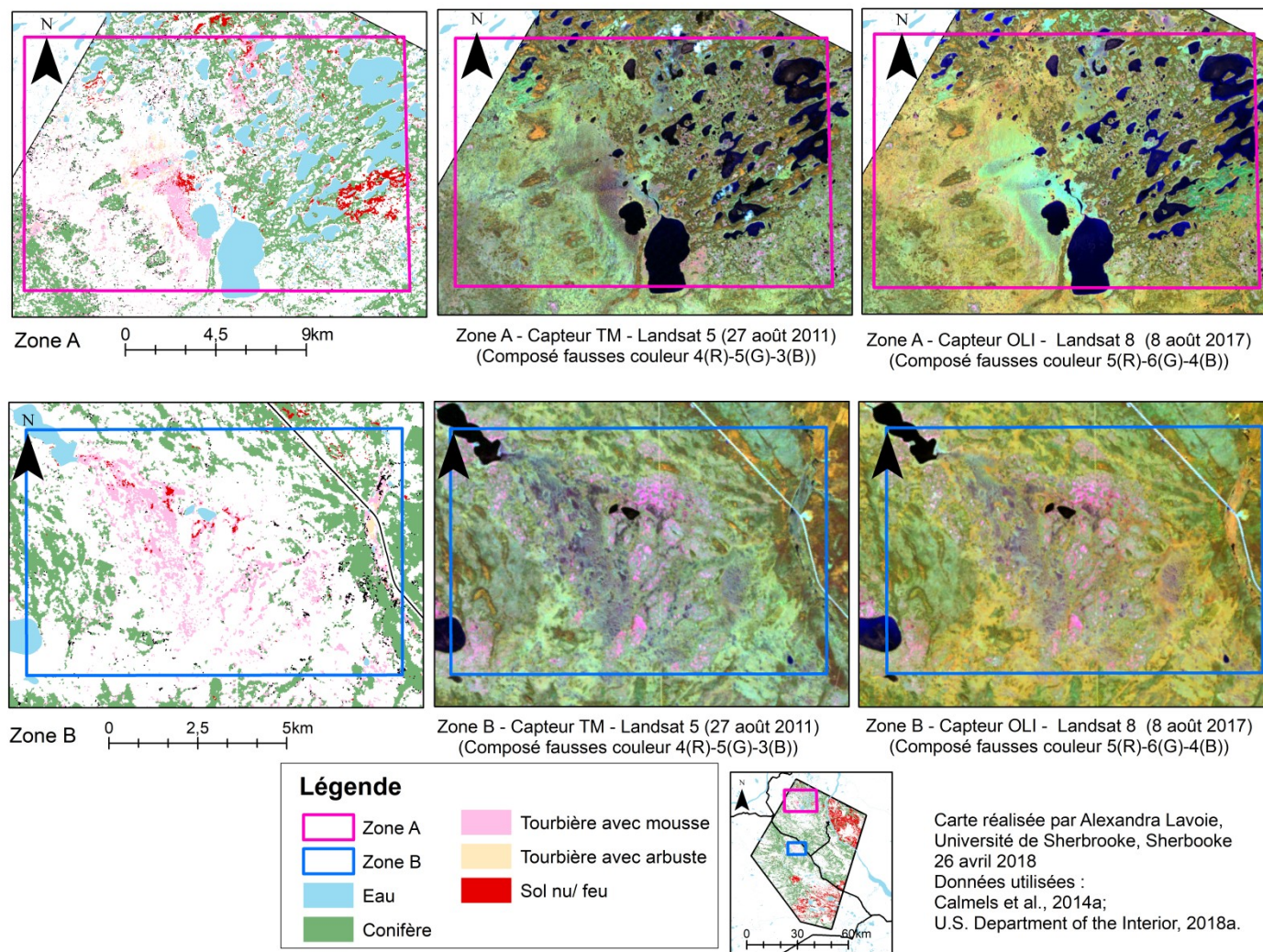


Figure 5.4 Zones d'intérêt pour l'analyse spatiotemporelle de la classe Conifère

### 5.2.2 Cartographie de l'évolution de la classe *Mixte*

La cartographie de l'évolution de la classe *Mixte* est disponible à la figure 5.5. La cartographie se limite à la classe *Mixte* présente en 2011 et les différentes couleurs indiquent ce qu'elle est devenue en 2017. On retrouve au nord-est et au sud-est une transition plus importante vers la classe *Sol nu/feu* ainsi que vers *Tourbière avec arbuste*. Pour les classes *Conifère* et *Tourbière avec mousse*, la distribution des modifications est diffuse à travers la zone d'étude.

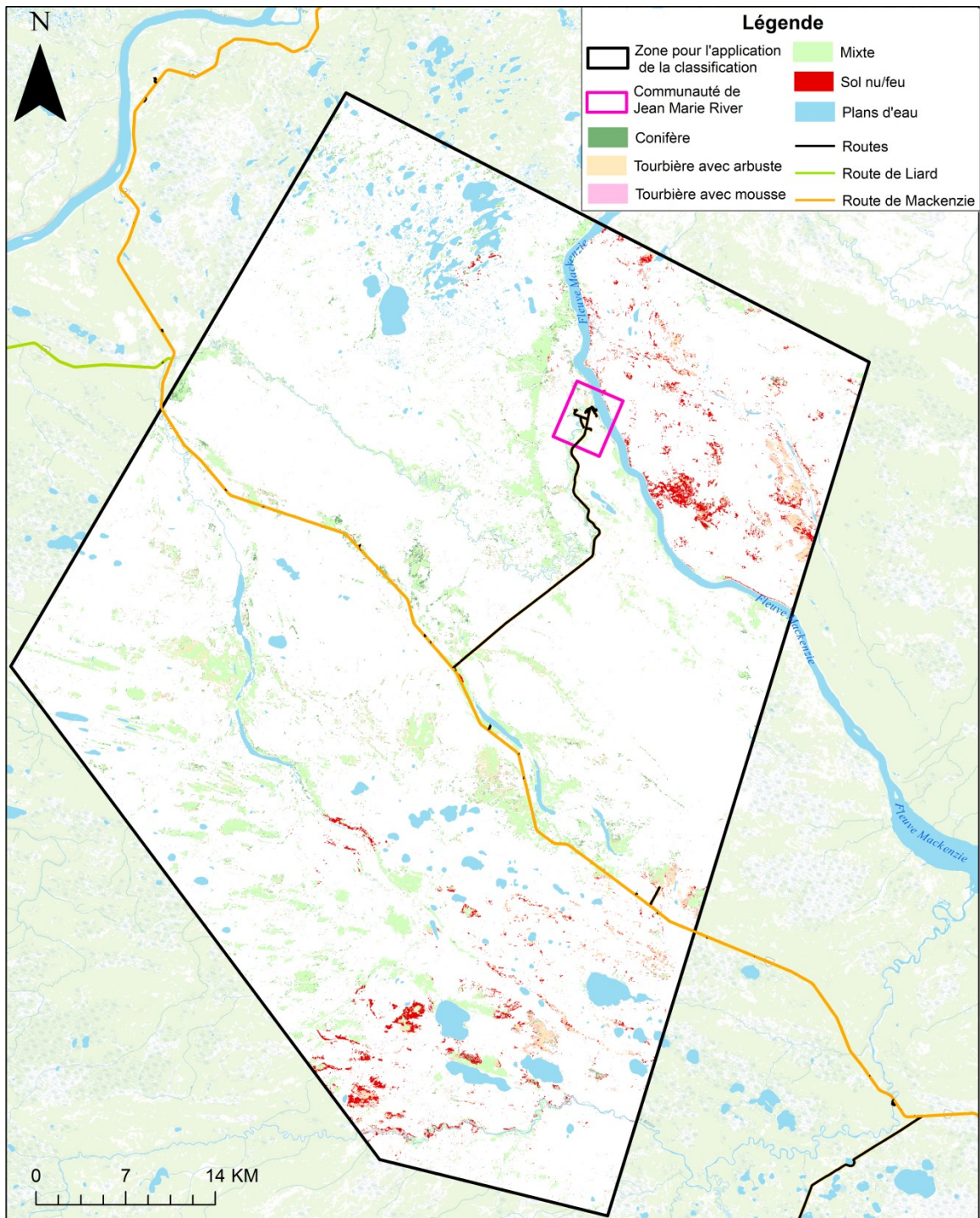
Les pourcentages de la superficie occupée par chacune des classes en 2017 sont disponibles au tableau 5.8.

Tableau 5.8 Superficie du territoire occupé par les classes de 2017 issues de la classe *Mixte* de 2011

Mixte en 2011	
Classe en 2017	Pourcentage de la superficie
Conifère	10,77
Mixte	59,71
Tourbière avec mousse	9,27
Tourbière avec arbuste	10,51
Sol nu/feu	9,74
total	100,00

Pour la classe *Mixte*, l'ampleur de changement de classe est assez semblable pour chacune des classes, mais elle est celle qui a perdu le plus grand pourcentage de sa superficie entre 2011 et 2017. Des modifications sont retrouvées sur l'ensemble du territoire, surtout pour les transitions vers la classe *Conifère* et *Tourbière avec mousse*. Près des zones touchées par des feux, soit au nord-ouest et au sud-est du territoire, on retrouve les variations les plus importantes entre les classifications. Dans ces zones, on observe une plus grande quantité de pixels qui ont été classifiés comme *Sol nu/feu* ou *Tourbière avec arbuste*. À la figure 5.6, deux zones ont été ciblées afin d'observer la différence entre les images Landsat utilisées pour les classifications.





Service Layer Credits: Sources: Esri, HERE, DeLorme, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, MapmyIndia, © OpenStreetMap

Carte réalisée par Alexandra Lavoie,  
Université de Sherbrooke, Sherbrooke  
26 avril 2018  
Données utilisées :  
Calmels et al., 2014a; U.S. Department of the Interior, 2018a.

*Figure 5.5 Classes de 2017 occupées par la classe Mixte de 2011 (Seul le territoire classifié comme Mixte en 2011 est cartographié)*

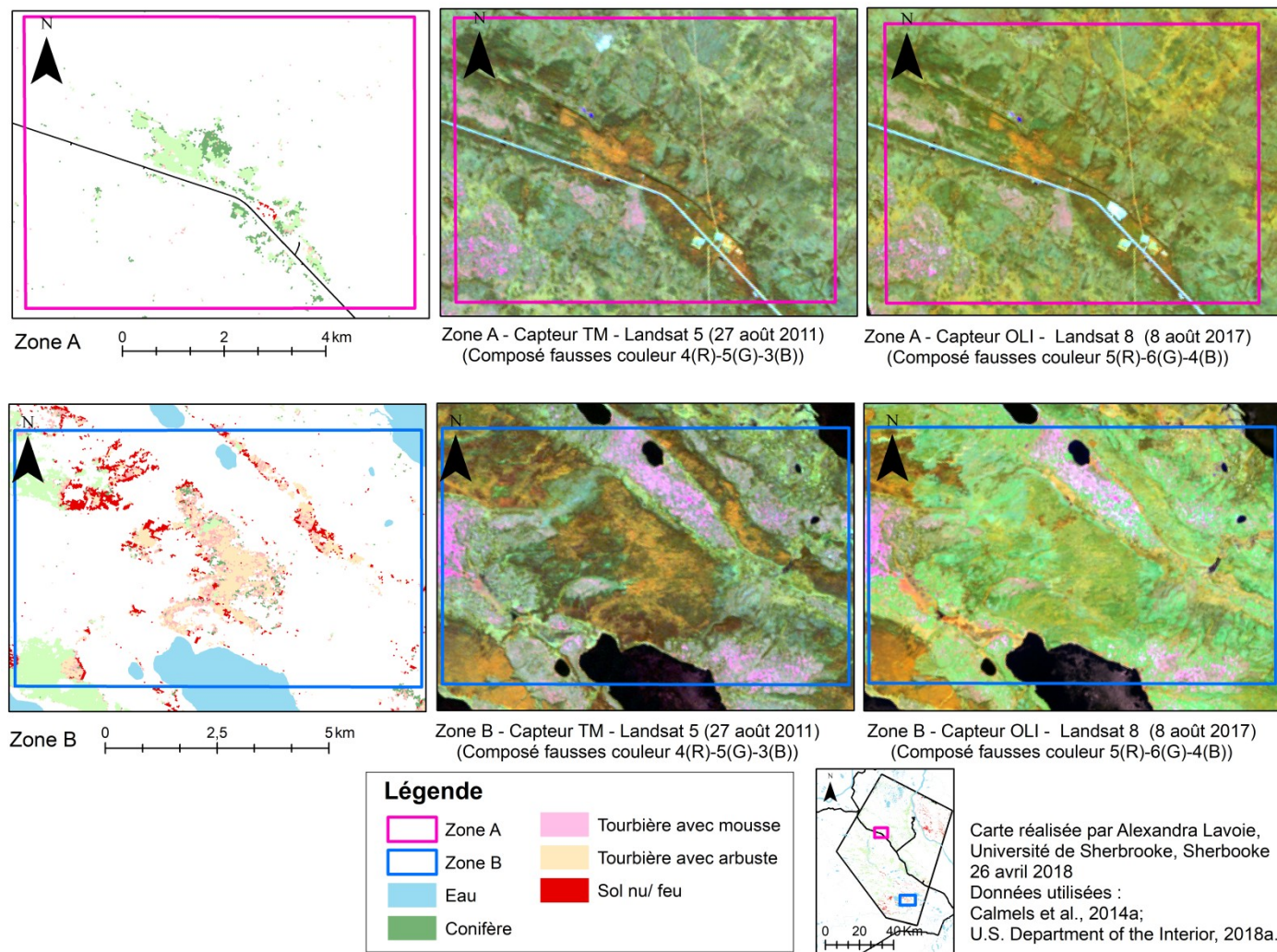


Figure 5.6 Zones d'intérêt pour l'analyse spatiotemporelle de la classe Mixte

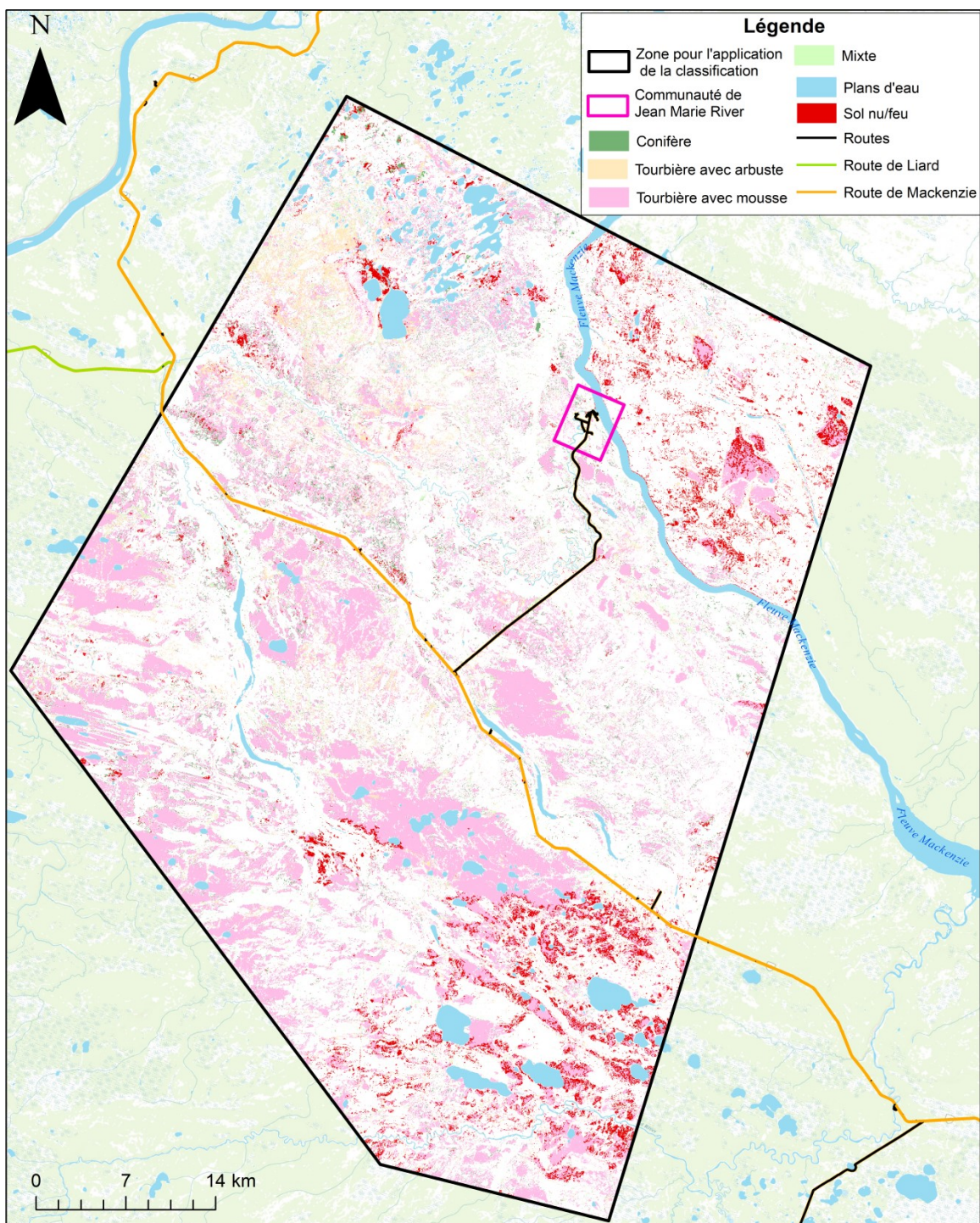


La zone A illustre une transition de pixel vers la classe *Conifère*. Il est possible d'observer une modification dans le teint des pixels par une diminution de la couleur orange entre l'image de 2011 et 2017. L'extrémité de la zone anciennement classifiée comme *Mixte* possède, en 2017, une couleur vert foncé qui est caractéristique de la classe *Conifère*. Pour la zone B, c'est une transition vers la classe *Tourbière avec arbuste* qui est représenté. La forêt de feuillu qui se retrouvait à cet endroit en 2011, visible en orange foncé avec des teintes de vert, n'est plus observable en 2017. Elle est remplacée par une teinte jaune-orange tirant sur le vert qui est attribuée à la classe *Tourbière avec arbuste*.

### **5.2.3 Cartographie de l'évolution de la classe *Tourbière avec mousse***

La carte de l'évolution de la classe *Tourbière avec mousse* est illustrée à la figure 5.7. La cartographie se limite à la classe *Tourbière avec mousse* présente en 2011 et les différentes couleurs indiquent ce qu'elle est devenue en 2017.

On observe au nord-est et au sud-est un changement plus prononcé vers la classe *Sol nu/feu*. La classe *Tourbière avec mousse* occupe des grandes zones sans modification de classe au sud de la route de Mackenzie. Au nord-est, une transition vers la classe *Tourbière avec arbuste* est visible. Pour les classes *Mixte* et *Conifère*, les changements sont plus diffus.



Service Layer Credits: Sources: Esri, HERE, DeLorme, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, MapmyIndia, © OpenStreetMap

Carte réalisée par Alexandra Lavoie,  
Université de Sherbrooke, Sherbrooke  
26 avril 2018  
Données utilisées :  
Calmels et al., 2014a; U.S. Department of the Interior, 2018a.

*Figure 5.7 Classes de 2017 occupées par la classe Tourbière avec mousse de 2011 (Seul le territoire classifié comme Tourbière avec mousse en 2011 est cartographié)*

Le tableau 5.9 permet de retrouver l'information sur le pourcentage de la superficie occupée par chacune des classes.

*Tableau 5.9 Superficie du territoire occupé par les classes de 2017 issues de la classe Tourbière avec mousse de 2011*

Tourbière avec mousse en 2011	
Classe en 2017	Pourcentage de la superficie
Conifère	6,21
Mixte	3,77
Tourbière avec mousse	69,38
Tourbière avec arbuste	10,28
Sol nu/feu	10,36
Total	100,00

On retrouve environ 10,28 % des pixels de *Tourbière avec mousse* dans la classe *Tourbière avec arbuste* en 2017, soit quasiment autant que pour la classe *Sol nu/feu*. Les modifications vers la classe *Tourbière avec arbuste* sont importantes au nord-est du territoire étudié et est représenté à la zone A de la figure 5.8. L'image de 2017 est caractérisée par une plus grande présence de jaune, couleur caractéristique des tourbières avec arbustes, que l'année 2011. Cette observation est aussi visible à la zone B.



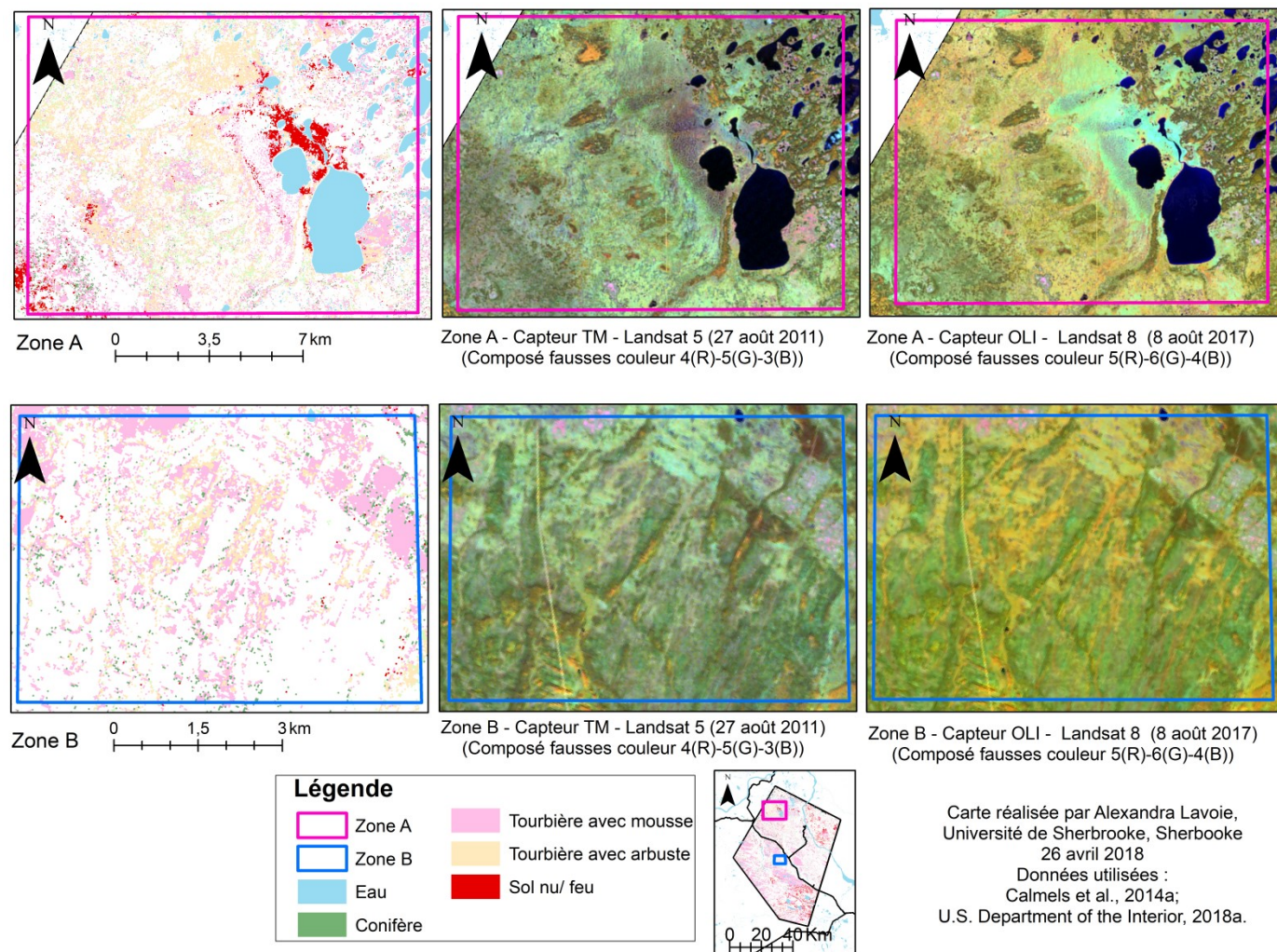


Figure 5.8 Zones d'intérêt pour l'analyse spatiotemporelle de la classe Tourbière avec mousse

Certains nuages n'ont pas été supprimés par le masque lors du prétraitement de l'image Landsat 5-TM. La plupart des nuages qui sont restés sur l'image ont été classifiés comme *Tourbière avec mousse*. Ainsi, une partie des changements de classe pour cette catégorie peut être due aux nuages. Une capture d'écran d'un exemple de changement de classe dû à cette situation est disponible à la figure 5.9.

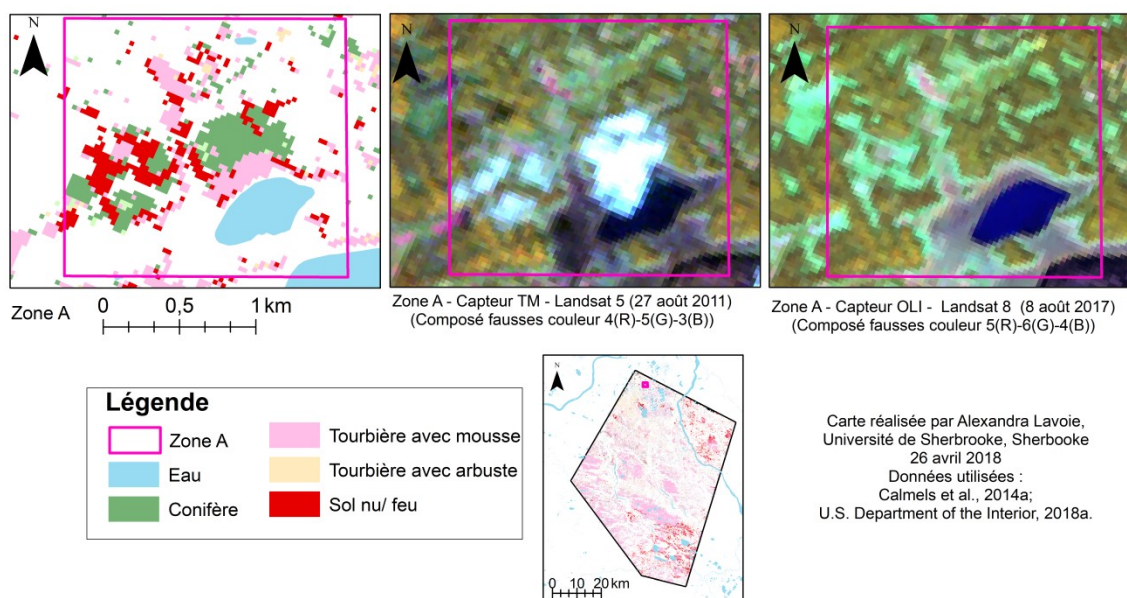
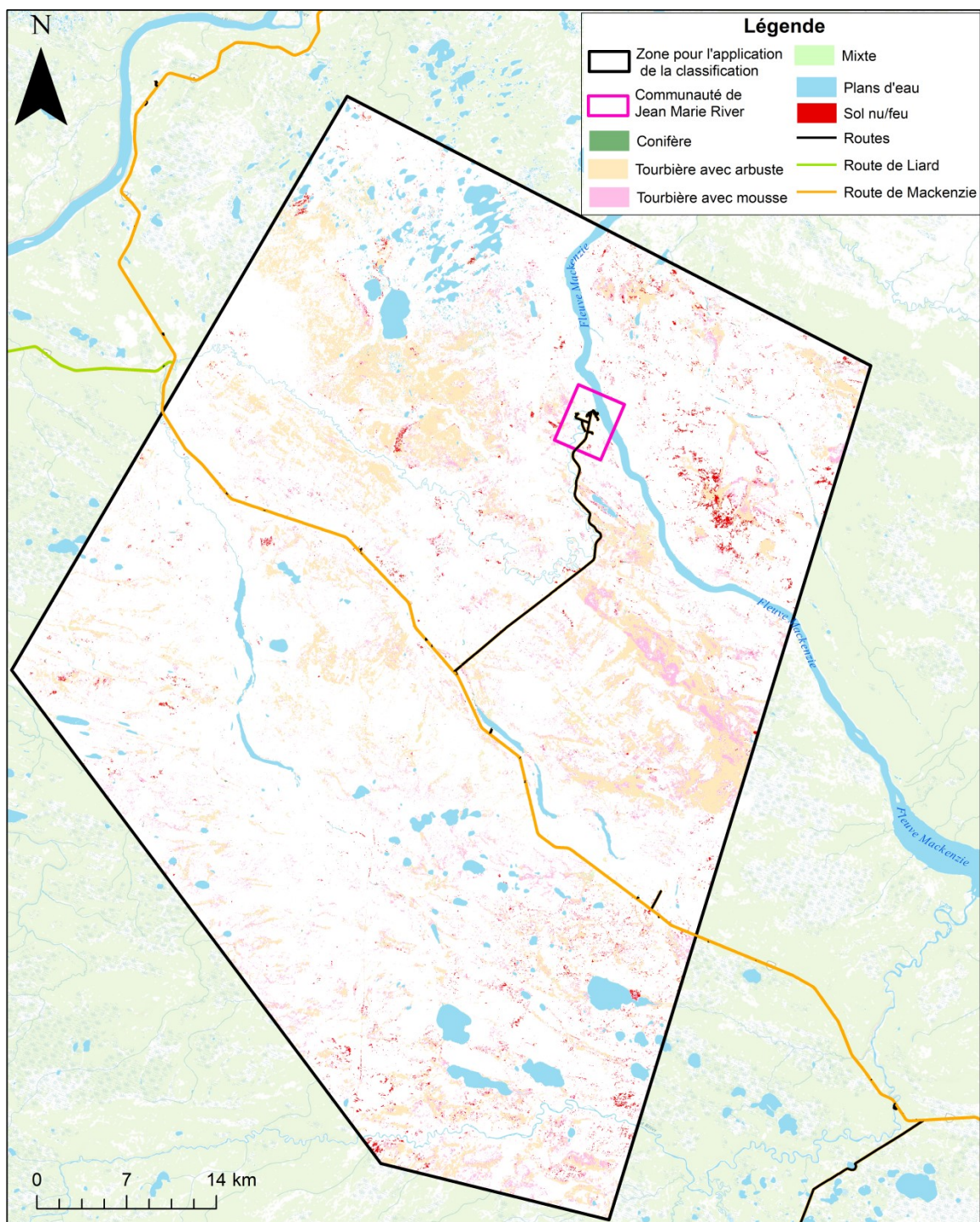


Figure 5.9 Effet de la présence d'un nuage non masqué sur une image de la classification

#### 5.2.4 Cartographie de l'évolution de la classe *Tourbière avec arbuste*

La carte de l'évolution de la classe *Tourbière avec arbuste* est disponible à la figure 5.10. La cartographie se limite à la classe *Tourbière avec arbuste* présente en 2011 et les différentes couleurs indiquent ce qu'elle est devenue en 2017. On observe une transition sur l'ensemble du territoire étudié vers la classe *Tourbière avec mousse*. Les changements vers les classes *Conifère* et *Mixte* sont moins visibles et touchent plus des pixels isolés les uns des autres. On observe des zones caractérisées par la classe *Sol nu/feu* au nord et au sud-est du territoire étudié.





Service Layer Credits: Sources: Esri, HERE, DeLorme, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, MapmyIndia, © OpenStreetMap

Carte réalisée par Alexandra Lavoie,  
Université de Sherbrooke, Sherbrooke  
26 avril 2018  
Données utilisées :  
Calmels et al., 2014a; U.S. Department of the Interior, 2018a.

*Figure 5.10 Classes de 2017 occupées par la classe Tourbière avec arbuste de 2011 (Seul le territoire classifié comme Tourbière avec arbuste en 2011 est cartographié)*

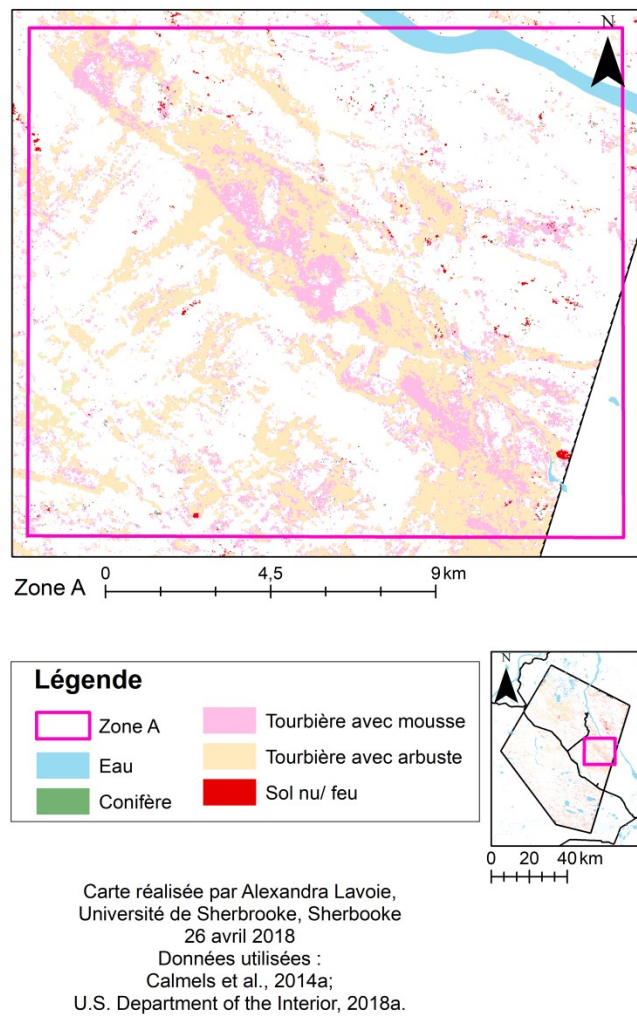


Le tableau 5.10 présente le pourcentage de superficie occupée par chacune des classes après la comparaison.

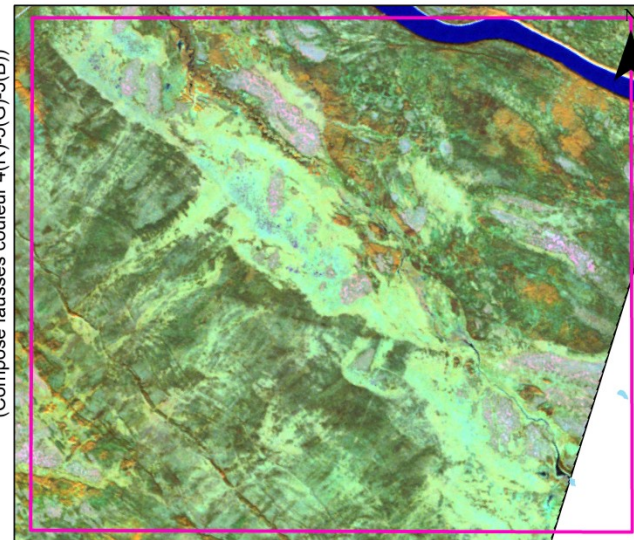
*Tableau 5.10 Superficie du territoire occupé par les classes de 2017 issues de la classe Tourbière avec arbuste de 2011*

Tourbière avec arbuste en 2011	
Classe en 2017	Pourcentage de la superficie
Conifère	0,60
Mixte	1,50
Tourbière avec mousse	28,64
Tourbière avec arbuste	63,84
Sol nu/feu	5,42
Total	100,00

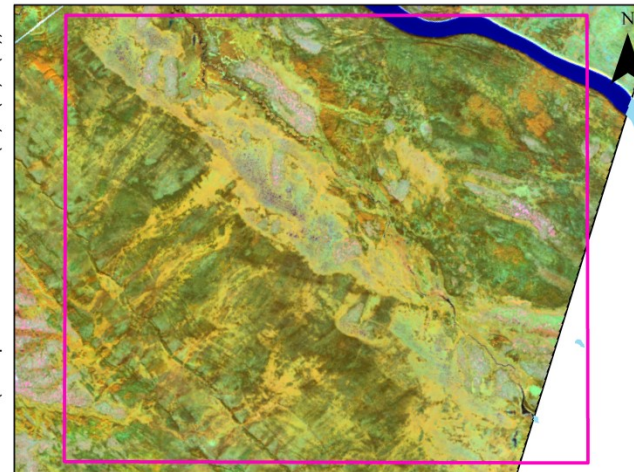
Peu de transitions vers les classes *Conifères* et *Mixte* ont été observés suite à la comparaison entre les deux classifications. Seulement 0,60 % de la superficie de *Tourbière avec arbuste* a été classifié comme *Conifère* en 2017 et 2,58 % vers *Mixte*. La classe *Tourbière avec arbuste* est celle qui a subi le moins de changement vers la classe *Sol nu/feu* dans l'ensemble des classes, avec 5,42 % de sa superficie. Le plus grand changement observé est vers la classe *Tourbière avec mousse* et est retrouvé sur l'ensemble du territoire. La figure 5.11 présente une zone à l'est où le phénomène est particulièrement marqué. Sur l'image de 2017, il est possible d'observer du violet qui n'est pas présent sur l'image de 2011, dans les endroits qui ont été classifiés comme *Tourbière avec mousse*.



Zone A - Capteur TM - Landsat 5 (27 août 2011)  
(Composé fausses couleurs 4(R)-5(G)-3(B))



Zone A - Capteur OLI - Landsat 8 (8 août 2017)  
(Composé fausses couleurs 5(R)-6(G)-4(B))



*Figure 5.11 Zones d'intérêt pour l'analyse spatiotemporelle de la classe Tourbière avec arbuste*

### 5.3 Cartographie de l'indice de qualité de l'habitat du caribou boréal pour la zone étudiée

Le résultat de l'application de l'IQH du caribou boréal pour la zone étudiée est présenté à la figure 5.12.

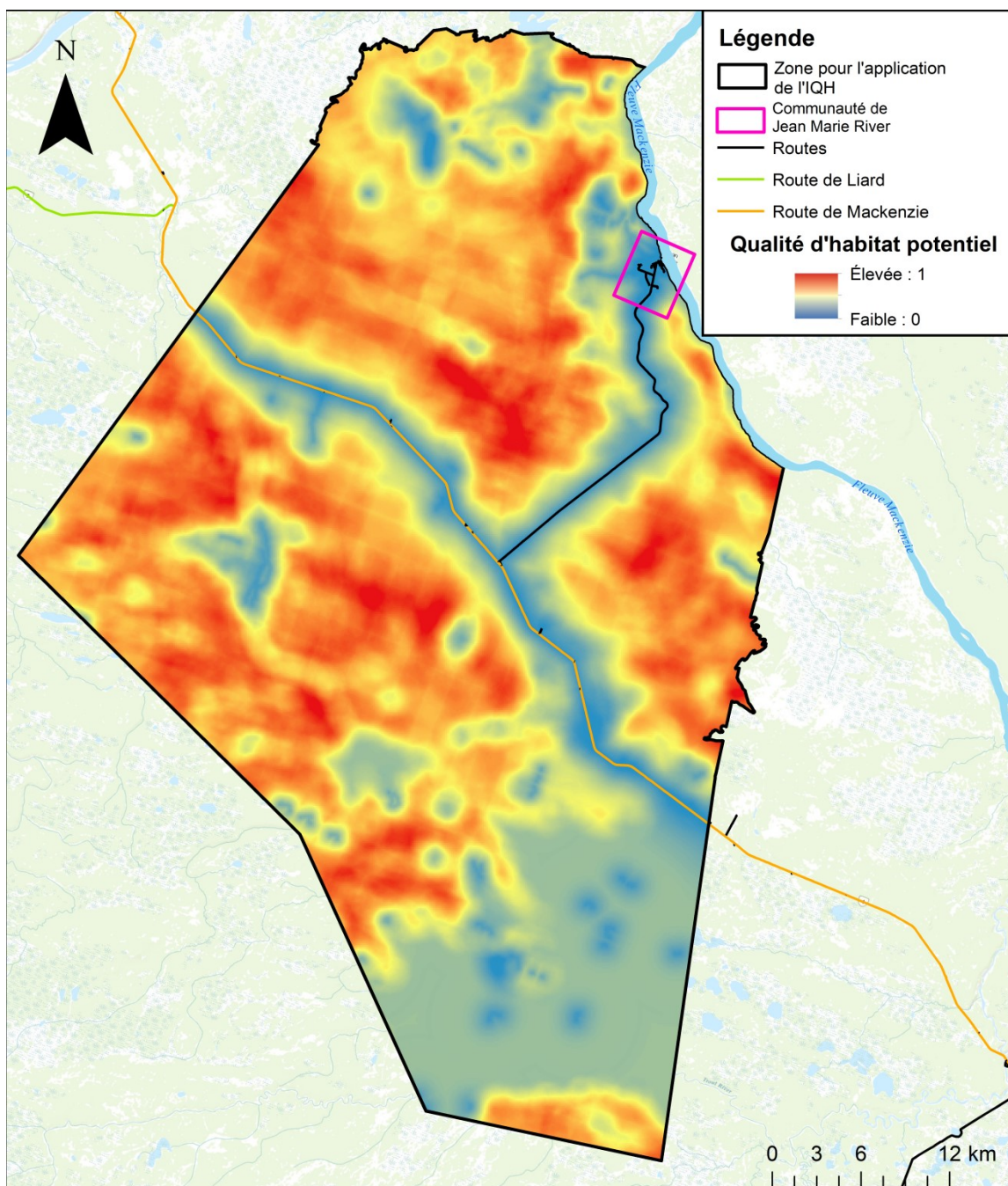
La qualité d'habitat potentiel est faible dans le sud-est du territoire étudié et plus élevée au sud et au nord de la route de Mackenzie. Une zone à l'est est aussi caractérisée par une qualité d'habitat potentiel élevée. Aucune catégorisation des valeurs d'IQH n'est proposée dans Leblond et al., (2014a), il a été décidé d'utiliser les catégories de valeur utilisées dans l'IQH de Dussault et al., (2002) pour l'original qui est mentionné dans Leblond et al., (2014a). Trois catégories de qualité d'habitat potentiel sont déterminées, soit faible ( $IQH \leq 3$ ), moyenne (0,4 – 0,6) et élevée (0,7-1). Le tableau 5.11 présente la superficie couverte par chacune des catégories sur le territoire étudié. La catégorie *Élevée* est celle qui a le plus grand pourcentage d'occupation, suivi de *Moyenne* et *Faible*.

*Tableau 5.11 Superficie du territoire occupé par chacune des catégories de valeurs de qualité d'habitat potentiel*

	Qualité d'habitat potentiel			Total
	Faible IQH $\leq 0,3$	Moyenne 0,4-0,6	Élevée 0,7-1	
Superficie (km <sup>2</sup> )	630,71	718,29	979,79	2328,79
Pourcentage	27,08	30,84	42,07	100

Des cartes ont été produites afin d'observer l'IQH en lien avec les différentes variables utilisées pour son application. À la figure 5.13, les variables composant la catégorie *Infrastructures humaines* ont été superposées à l'IQH.





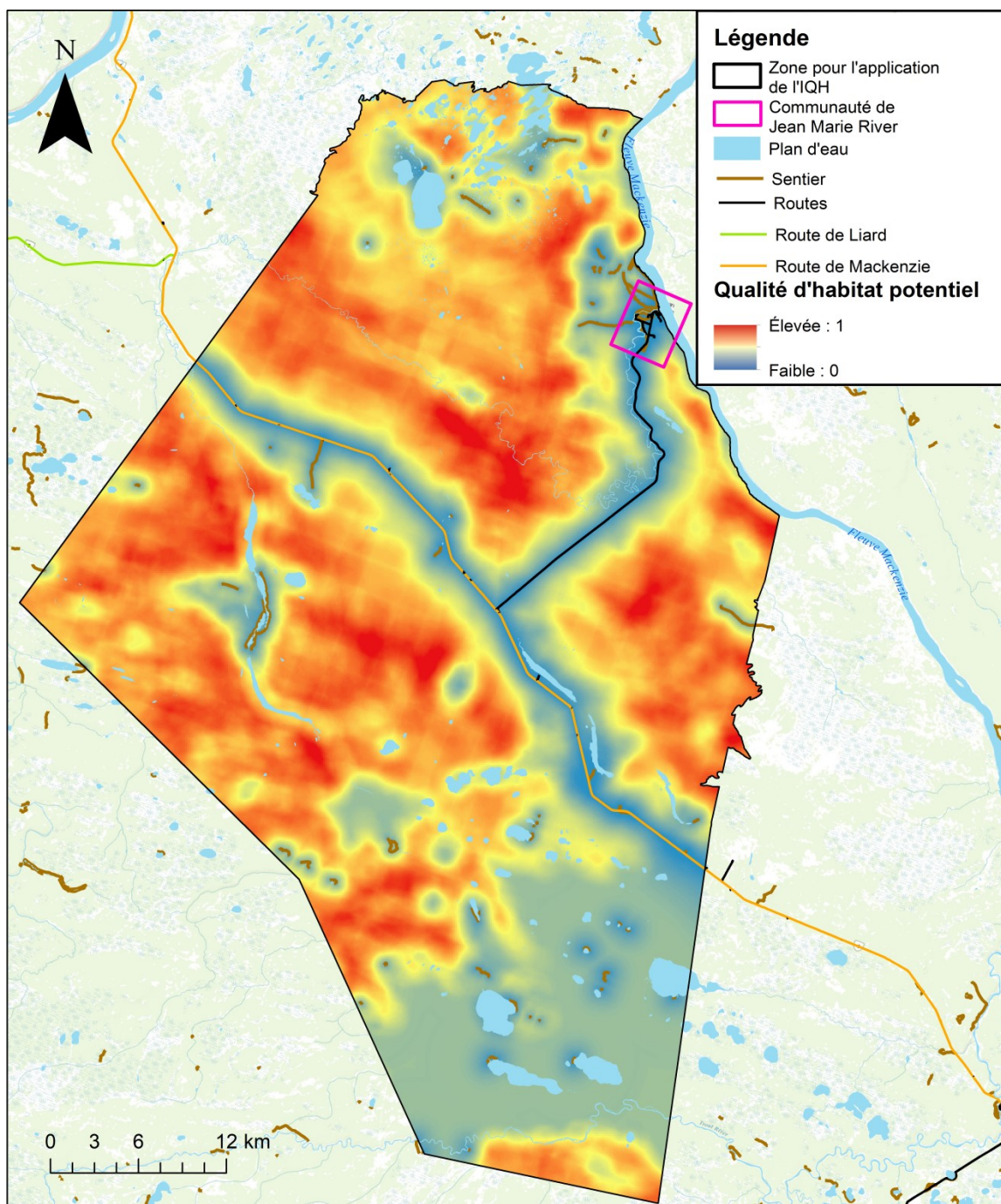
Service Layer Credits: Sources: Esri, HERE, DeLorme, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, MapmyIndia, © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community

Carte réalisée par Alexandra Lavoie,  
Université de Sherbrooke, Sherbrooke  
26 avril 2018

Données utilisées :  
Calmels et al., 2014a; Northwest Territories Centre for Geomatics, 2018;  
Ressources naturelles Canada, 2017b; U.S. Department of the Interior, 2018a.

*Figure 5.12 Cartographie du modèle de qualité d'habitat pour le caribou boréal sur le territoire de Jean Marie River*





Service Layer Credits: Sources: Esri, HERE, DeLorme, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, MapmyIndia, © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community

Carte réalisée par Alexandra Lavoie,  
Université de Sherbrooke, Sherbrooke  
26 avril 2018

Données utilisées :  
Calmels et al., 2014a; Northwest Territories Centre for Geomatics, 2018;  
Ressources naturelles Canada, 2017b; U.S. Department of the Interior, 2018a.

*Figure 5.13 Cartographie de la comparaison entre l'emplacement des infrastructures humaines et l'IQH*

La qualité d'habitat potentiel près de la route de Mackenzie, qui sépare la zone d'étude en deux, ainsi que près de l'embranchement liant la communauté de Jean Marie River à la route est faible. Aux alentours des sentiers, la qualité est faible comme pour les routes. Les plans d'eau ont aussi été ajoutés à la carte bien que cela ne soit pas une information utilisée pour l'application de l'IQH. On peut observer que plus la superficie du polygone hydrique est grande, moins la qualité d'habitat potentiel dans le secteur semble élevée.

L'IQH a été comparé aussi avec les variables *Conifères* et *Milieux humides* des *Catégories d'habitat*. À la figure 5.14, il est possible d'observer que les zones caractérisées par la présence de conifères ont une qualité d'habitat potentiel plus élevée que les zones avec des milieux humides. Près des routes pavées, malgré la présence de ces deux variables, la qualité de l'habitat potentiel reste faible.

Les autres variables des *Catégories d'habitat* ont été ajoutées sur la carte de l'IQH à la figure 5.15. Au sud du territoire, on retrouve la plus grande superficie occupée par une qualité de l'habitat potentiel faible. C'est à cet endroit qu'un feu de forêt a eu lieu en 2013 (Northwest Territories Centre for Geomatics, 2018). Une baisse dans la qualité de l'habitat est visible dans cette zone, causée principalement par la présence de sentier comme il est possible d'observer à la figure 4.13.

Une diminution générale de la qualité potentielle d'habitat est observée près des milieux en régénération et des zones caractérisées par des perturbations naturelles. L'effet des bandes défrichées est beaucoup moins visible. La qualité potentielle de l'habitat semble légèrement diminuer pour les zones retrouvées entre plusieurs bandes défrichées.

À la figure 5.16, des zones caractérisées par une faible qualité d'habitat potentiel sont présentées. Ces zones ne sont pas caractérisées par des perturbations naturelles ni par des milieux en régénération, mais ils sont occupés principalement par la classe de végétation *Mixte* qui n'est pas considérée dans l'équation de l'IQH. Les zones A et C sont aussi caractérisées par la présence de plan d'eau.



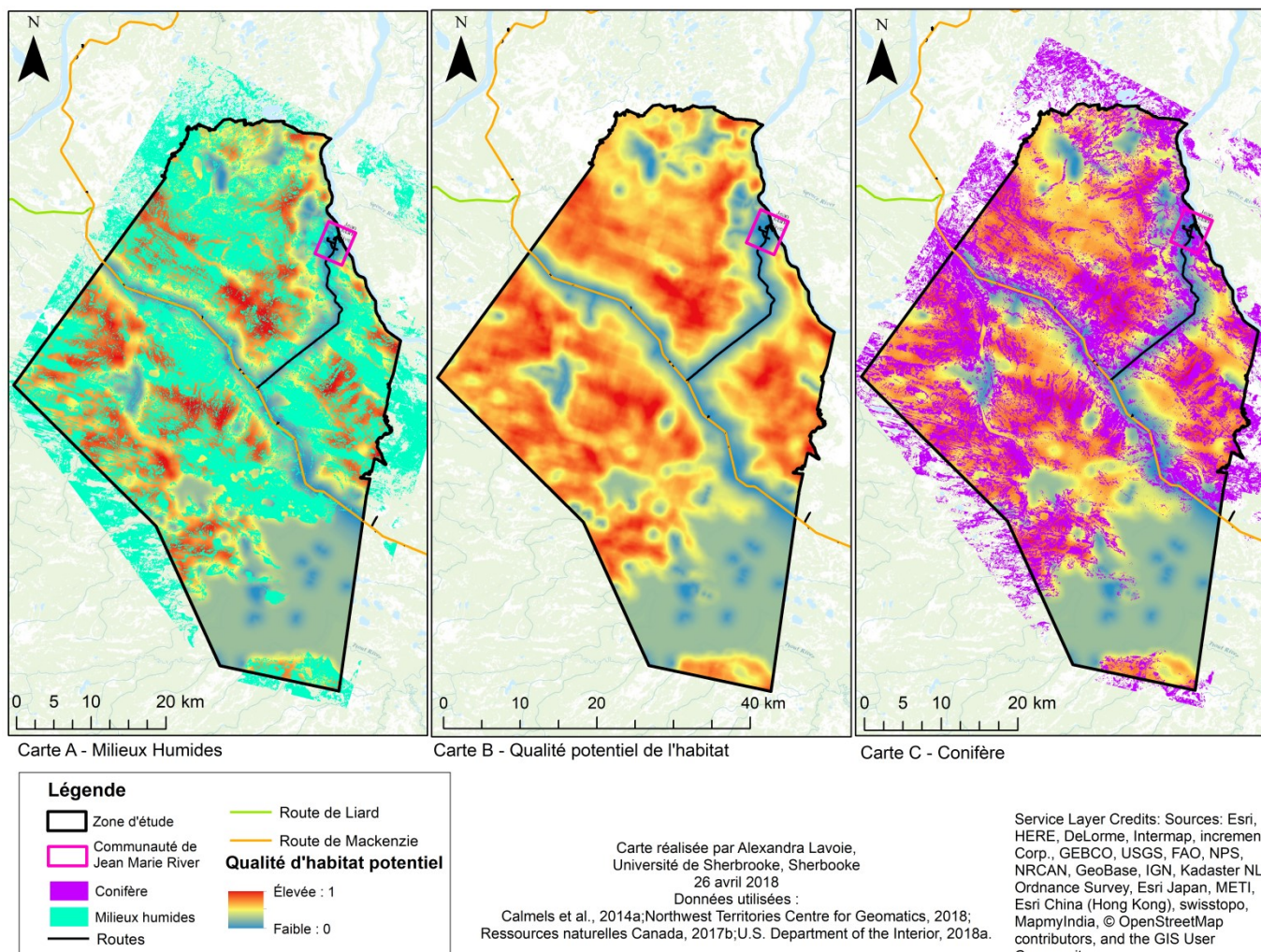
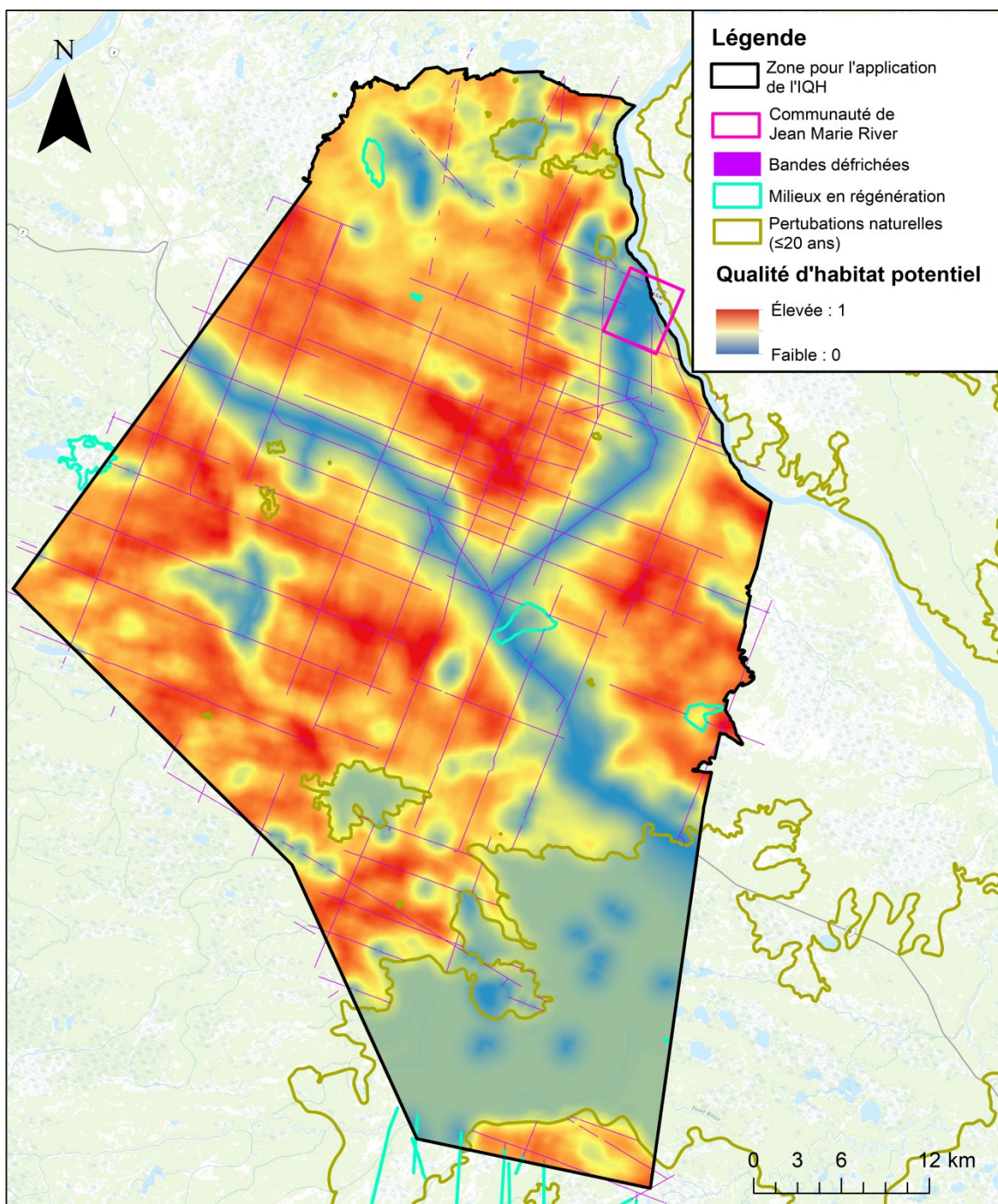


Figure 5.14 Cartographie de la comparaison des variables d'habitat Conifère et Milieux humides avec l'IQH





Service Layer Credits: Sources: Esri, HERE, DeLorme, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, MapmyIndia, © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community

Carte réalisée par Alexandra Lavoie,  
Université de Sherbrooke, Sherbrooke  
26 avril 2018

Données utilisées :  
Calmels et al., 2014a; Northwest Territories Centre for Geomatics, 2018;  
Ressources naturelles Canada, 2017b; U.S. Department of the Interior, 2018a.

*Figure 5.15 Cartographie de la comparaison des variables d'habitat Bandes défrichées, Milieux en régénération et Perturbations naturelles  $\leq 20$  ans avec l'IQH*



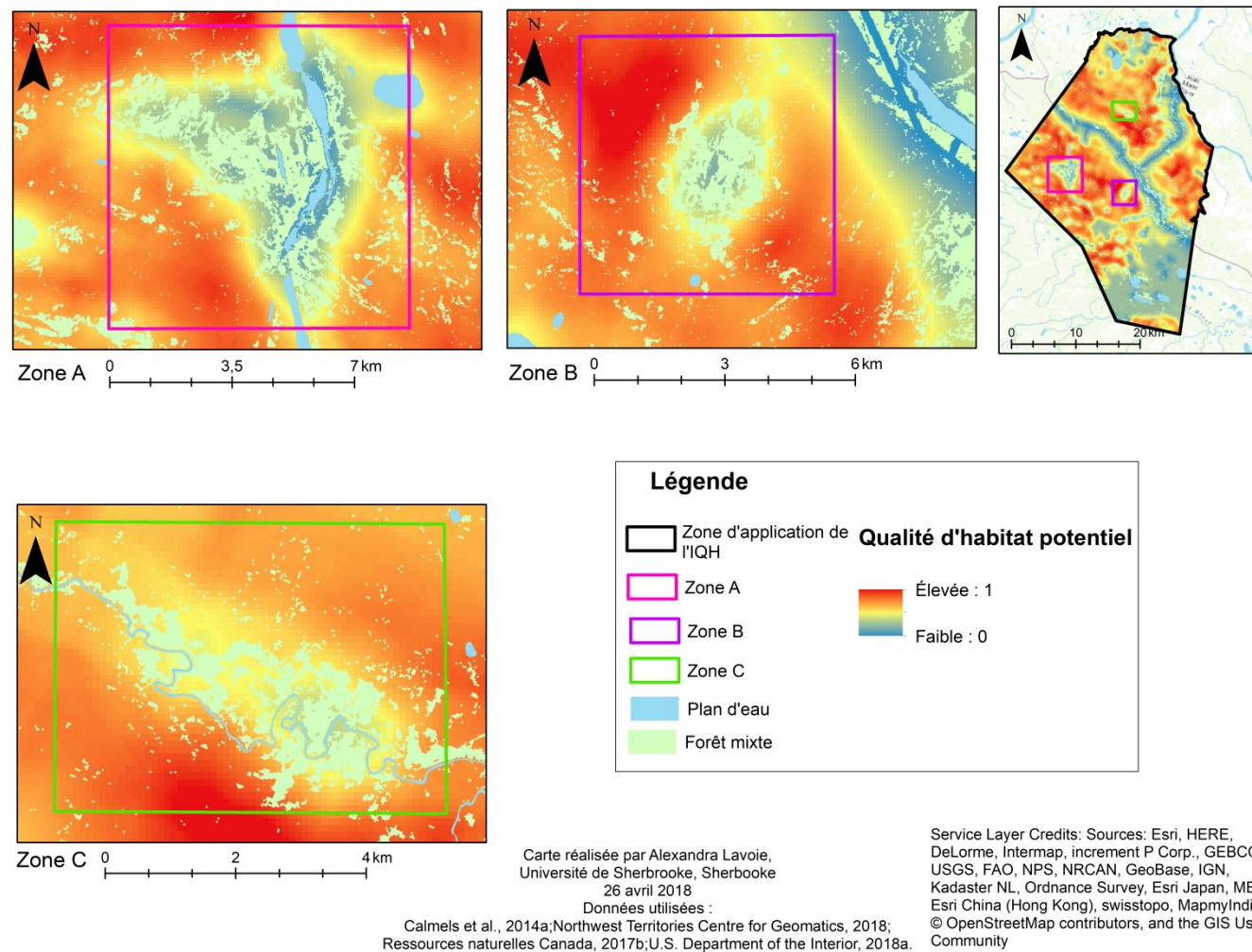


Figure 5.16 Zones avec une faible qualité potentielle d'habitat caractérisées par une présence importante de forêt mixte

## 6 DISCUSSION DES RÉSULTATS

Suite à la présentation des résultats obtenus dans l'essai, une analyse est nécessaire afin de mettre en contexte les différentes informations acquises et pour proposer des recommandations sur la suite du projet. Cette section discute donc des résultats obtenus pour la comparaison de l'évolution du couvert végétal de la zone d'étude entre 2011 et 2017, ainsi que de l'évaluation de l'IQH adapté qui a été utilisé pour le caribou boréal. Par la suite, les limites de l'essai sont présentées suivies par des recommandations pour les projets à venir.

### 6.1 Comparaison et analyse de l'évolution du couvert végétal de la région étudiée entre 2011 et 2017

Suite à l'observation des résultats de la comparaison spatiotemporelle, plusieurs hypothèses peuvent être apportées afin d'expliquer les changements observés entre les deux classifications. Les différents stress hydriques (sécheresses et inondations) peuvent jouer un rôle important dans la modification de l'occupation de la végétation et la période entre 2011 et 2017 a subi plusieurs variations climatiques importantes. En 2012, plusieurs régions des Territoires du Nord-Ouest, dont la région de Dehcho, ont subi des conditions de sécheresse considérables (Olesinski and Brett, 2016). Ces conditions ont atteint leur maximum en 2014, provoquant la plus grande saison de feux de forêt jamais enregistrée dans les Territoires du Nord-Ouest avec 3.4 millions d'hectares touchés (Olesinski and Brett, 2016). Durant cette période, plusieurs feux de forêt ont été enregistrés sur la zone étudiée et l'ajout de la classe *Sol nu/feu* pour l'année 2017 a permis de répertorier les zones touchées qui étaient encore en régénérations. La classe *Conifère* est celle qui a eu la plus grande diminution dans sa superficie liée aux feux de forêt, mais toutes les classes ont subi des pertes de superficie liées à cette classe. Cela est surement attribuable au fait que la classe *Conifère* est la plus présente dans les zones touchées par les feux de forêt. En plus des feux de forêt, les conditions de sécheresse augmentent la vulnérabilité de la végétation face aux insectes et maladies (Olesinski and Brett, 2016), ce qui peut amener une variation dans la signature spectrale de la végétation (Xie et al., 2008). En 2016, les conditions plus humides dans la région ont contribué à l'augmentation de l'activité de

différents pathogènes et une augmentation de 8.5 % dans la superficie forestière touchée par des agents pathogènes et des insectes a été observée en 2017 dans les Territoires du Nord-Ouest, telles la rouille des feuilles (*Melampsora spp.*), la tache marssoninienne (*Marssonina populi*) et la rouille-tumeur autonome (*Endocronartium harknessii*) (Olesinski and Brett, 2017).

En ce qui concerne la diminution de la superficie des forêts mixte entre 2011 et 2017, elle peut être liée au déclin qui a été observé pour les peupliers faux-trembles (*Populus tremuloides*) dans la région de Dehcho. La cause principale de ce déclin n'est pas encore connue, mais des études sur un phénomène semblable observé dans les Prairies ont lié les changements de l'humidité du sol à la dégradation des peupliers faux-trembles. Dans la région de Dehcho, ces changements pourraient être causés par l'augmentation de l'humidité du sol entraînée par le dégel du pergélisol suite au réchauffement du climat et à l'augmentation du nombre de feux de forêt (Olesinski and Brett, 2017). Une autre source de dégradation des feuillus dans la région est liée à la présence des mineuses serpentes du tremble (*Phylloscnistis populiella*) qui touche les peupliers faux-tremble et les peupliers baumier (*Populus balsamigera*) (Ressources Naturelles Canada, 2015; Olesinski and Brett, 2017). Habituellement considéré comme un ravageur peu nuisible, son effet sur la santé de la végétation se voit augmenter dû à sa présence prolongée et accrue dans la région (Olesinski and Brett, 2017). La défoliation causée par cet insecte peut être une des causes de la diminution de la superficie occupée par les forêts mixtes observée lors de la comparaison spatiotemporelle, toutefois il serait nécessaire de confirmer sur le terrain cette hypothèse.

L'analyse de l'évolution de la végétation doit prendre en considération l'influence du dégel du pergélisol puisque le territoire étudié se retrouve entre les zones de pergélisol discontinu étendu et sporadique (Brown et al., 2013). Le degré de dégel du pergélisol influence la disposition de la couverture forestière et des milieux humides (Helbig et al., 2016). Le dégel du pergélisol riche en glace peut provoquer la formation de dépressions/subsidences thermokarstiques qui modifient les paysages et les écosystèmes en plus de changer les dynamiques des processus biologiques et hydrologiques (Brown et al., 2013). Il augmente grandement l'humidité dans le sol, apportant des modifications

dans le drainage et l'humidité de surface, pouvant entraîner l'inondation des racines et la mort de la végétation (Chasmer et Hopkinson, 2017). On retrouve alors dans les zones touchées par le dégel du pergélisol des zones de forêt surélevée transformées en vastes zones humides (Brown et al., 2013). Ce phénomène pourrait expliquer les modifications observées de la classe *Conifère* vers la classe *Tourbière avec mousse* entre 2011 et 2017, surtout dans les zones où le changement semble touché un territoire continu, par exemple au nord-ouest du territoire étudié ainsi qu'au sud de la route Mackenzie.

Pour les variations entre les classes *Tourbière avec arbuste* et *Tourbière avec mousse*, la succession de la végétation dans ce type de milieu peut être causée par le changement dans les nutriments disponibles, les variations hydriques et les modifications dans la balance thermique du sol et du climat. Le pourcentage de superficie de la classe *Tourbière avec arbuste* classifié comme *Tourbière avec mousse* en 2017 est plus important que l'inverse. Plusieurs hypothèses liées aux changements climatiques peuvent expliquer ce phénomène. Il a été observé que l'activité photosynthétique ainsi que le taux de croissance de la sphaigne, caractéristique de la classe *Tourbière avec mousse*, semblent augmenter avec la température si la disponibilité en eau nécessaire à sa croissance est suffisante. Comme mentionné plus haut, les conditions plus humides dans le sol entraînées par la dégradation du pergélisol retrouvé dans ces zones pourraient contribuer au remplacement graduel des espèces préférant les habitats secs aux sphaignes qui préfère les milieux plus humides sur une plus grande période de temps. De plus, la productivité des plantes vasculaires retrouvées dans la classe *Tourbière avec arbuste* peut être diminuée par des périodes répétées de gel et de dégel durant l'hiver, ce qui peut même tuer la végétation et laisser la place à d'autres types de végétation. Toutefois, les effets à long terme de l'augmentation de la température facilitent le retour des conditions de sécheresse continue qui devrait amener un retour vers une domination des plantes vasculaires dans les tourbières (Zhaojun et al., 2011). Ainsi il serait probable d'observer une grande variation entre ces deux classes durant les années à venir selon les variations du climat.

Ainsi, les changements dans l'occupation des classes observés lors de la comparaison spatiotemporelle de la classification peuvent être liés à plusieurs hypothèses. Toutefois, il

serait nécessaire de valider ces hypothèses avec des vérifications terrains et avec une analyse sur une plus longue période de temps. Il y a aussi la variabilité et les erreurs liées à la classification qui doivent être considérées lors de l'évaluation des différences entre les deux années. La classification de la végétation nécessite la différenciation des signatures spectrales de chacune des classes, ce qui peut être une tâche complexe (Xie et al., 2008). Le comportement spectral de la végétation n'est pas constant et varie selon le type de végétation et selon les changements physiologiques liés au stress ou aux différents stades phénologiques (Anselme et Gadai, 2008). Ainsi, une zone d'étude peut être caractérisée par une composition végétale complexe ou par une variabilité dans les stades phénologiques qui amènent une fluctuation dans la signature spectrale d'une même classe de végétation. L'utilisation d'une meilleure résolution spatiale ou le développement d'une classification de la végétation composée d'un plus grand nombre de classes adapté à la variabilité des écosystèmes retrouvés sur le terrain peut aider à diminuer cette variabilité (Xie et al., 2008).

À la suite de l'analyse de l'évolution observée dans le couvert végétal de 2011 et 2017, il est possible d'émettre plusieurs hypothèses sur les impacts possibles de ces modifications sur le caribou boréal. Le principal impact est la perte et la dégradation de son habitat qui amènent d'autres problématiques liées à l'augmentation de la prédation et à des modifications dans la qualité et la disponibilité de son alimentation. Tout d'abord, les changements liés à la classe *Conifère* entre 2011 et 2017 peuvent avoir amené une perte de superficie dans les zones occupées par de vieilles forêts de conifères limitrophes et exemptes de perturbations, habitat prisé par la population. Ces pertes peuvent rendre le caribou boréal plus vulnérable aux prédateurs en plus de diminuer la disponibilité de lichen, une source d'alimentation importante lors de la saison hivernale. Les analyses de l'évolution de la végétation amènent aussi l'hypothèse de l'influence du dégel du pergélisol, qui peut être une autre cause de la perte et de la dégradation de son habitat par l'apparition de thermokarsts entraînant des changements permanents dans l'occupation du sol en modifiant la dynamique du territoire et la végétation. (Conference of Management Authorities, 2017; Mallory and Boyce, 2018)

## 6.2 Évaluation de la qualité de l'habitat du caribou boréal dans la région de Jean Marie River

Avant d'analyser le résultat de l'IQH appliqué à la région de Jean Marie River, il est primordial de savoir que la qualité d'habitat qui a été déterminée est relative et qu'il n'est pas possible de comparer les valeurs de qualité d'habitat de deux aires d'études différentes. Ainsi une valeur de 0.75 dans un milieu dégradé peut avoir une qualité d'habitat inférieur à une valeur de 0.60 retrouvée dans un territoire exempt de perturbations. Lors de l'analyse des résultats de l'IQH, il est donc nécessaire d'évaluer les résultats comme étant relatifs aux différentes variabilités d'habitat pouvant être retrouvées sur le territoire étudié (Leblond et al., 2014b).

On retrouve sur la zone d'étude trois zones avec une qualité d'habitat potentiel plus élevée qui sont séparées par des zones avec une qualité plus faible liée à la présence des routes traversant le territoire. Cela est dû au fait que l'IQH utilisé attribue une grande importance à l'influence des infrastructures humaines. Les variables liées à cette catégorie se retrouvent deux fois dans l'équation, soit par l'intégration de leur zone d'influence et aussi par le calcul de leur densité dans le contexte paysager de chaque cellule. La population du caribou boréal nécessite de larges territoires non perturbés pour ses déplacements afin d'être moins vulnérable face aux prédateurs (Conference of Management Authorities, 2017). La séparation des zones avec une bonne qualité d'habitat potentiel observé sur la zone d'étude pourrait être un signe de fragmentation du territoire et s'avérer nuisible pour le caribou boréal.

Une autre particularité de l'IQH utilisé est l'emploi de la proportion occupée comme variable pour les valeurs de *Catégories d'habitats* dans le contexte paysager. Cela entraîne une baisse de la qualité potentielle d'habitat lorsqu'une zone est traversée par un plan d'eau. Toutefois, les plans d'eau ne sont pas des zones nécessairement évitées par le caribou, malgré l'effet de fragmentation du territoire qu'ils peuvent causer (Conference of Management Authorities, 2017). En été, il a été observé que la population recherche la proximité des cours d'eau afin de se protéger des insectes (Species at Risk Committee, 2012). Il est important de considérer cet élément lors de l'analyse de l'application de

l'IQH sur un territoire afin de comprendre la faible qualité d'habitat potentiel pouvant être retrouvé à certains endroits.

Plusieurs menaces pour le caribou boréal, tels l'augmentation du nombre de cas de pluie sur neige ou les facteurs liés à la hausse de la prédation, ne sont pas considérées par l'IQH utilisé puisqu'il a été construit en utilisant les principaux facteurs limitatifs pour la population. Les éléments nécessitant des données empiriques ou des manipulations statistiques complexes n'ont pas été considérés puisque le modèle a été créé avec l'objectif d'être facilement applicable pour les utilisateurs potentiels. Cela implique donc un compromis entre la simplicité et la précision, ce qui a facilité l'adaptation du modèle au contexte et aux informations disponibles concernant le territoire de Jean Marie River (Leblond et al., 2014b). Toutefois avant de pouvoir utiliser l'IQH modifié comme outil de gestion ou outil d'analyse de l'évolution de l'habitat du caribou boréal, il est nécessaire de le valider avec des données sur le déplacement de la population sur le territoire.

### **6.3 Limites de l'essai**

Les limites sont présentées selon les deux grandes étapes de l'essai, soit la classification et l'application de l'IQH.

#### **6.3.1 Classifications**

Concernant les données utilisées pour la création des masques, la fiabilité de la couche vectorielle CanVec des plans d'eau n'est pas optimale. Certains cours d'eau ne semblent pas couverts par la couche vectorielle tandis que certains polygones de la couche ne correspondent pas à un plan d'eau sur les images Sentinel 2-MSI S2A. Ainsi certaines zones ont peut-être été masquées sans raison et des plans d'eau ont été classifiés puisqu'ils n'étaient pas masqués.

Il y a aussi une limite liée à la validité statistique de la méthode de classification *Maximum Likelihood* utilisée. Cette dernière a été employée conformément à la méthodologie de Calmels et al. 2014 b, mais aucune validation statistique n'a été effectuée.

Pour la classification de 2011, les images Sentinel 2-MSI S2A n'ont pas été utilisées pour le choix des zones d'entraînement et de validation, car le satellite n'était pas encore en

opération en 2011 (ESA, 2018c). Aucune donnée indépendante n'était donc disponible. Cette étape a donc été effectuée à l'aide de l'image Landsat 5-TM utilisée pour la classification et du résultat de la classification de Calmels et al., (2014a) comme référence. De plus, lors de l'analyse de la comparaison spatiotemporelle, un problème a été observé concernant l'application du masque des nuages sur l'image de 2011. Quelques nuages à l'extrémité nord-ouest du territoire étudié n'ont pas été masqués et ont été classifiés comme *Tourbière avec mousse*.

L'absence de documentation et d'archivage rigoureux de la classification de 2011 utilisée comme exemple pour la classification effectuée dans cet essai, est une limite à considérer. Ces éléments sont nécessaires pour transmettre de manière efficace l'information aux collaborateurs et permettre une reproduction de l'approche pour un suivi temporel. De plus un manque de rigueur peut compromettre tout l'exercice puisque ce genre de travail est souvent transféré d'une personne à l'autre. Cette limite persiste à la suite des travaux effectués pour cet essai, car la documentation et l'archivage des manipulations n'ont pas été effectués de la manière la plus rigoureuse possible.

La subjectivité, les connaissances et l'expérience de l'opérateur pour la délimitation des zones d'entraînement et de validation sont des limites à considérer lors de l'évaluation d'une classification puisqu'une grande variabilité est liée aux choix de ces zones. Dans le cadre de cet essai, l'expérience de l'opératrice était limitée aux travaux académiques effectués dans le passé. De plus, l'information principale utilisée pour le choix des zones provient de la méthodologie de la classification effectuée pour le projet de Calmel et al., (2014b) et aucune visite du territoire n'a été effectuée par l'opératrice, ce qui limite l'efficacité de la classification puisqu'il y a une différence entre l'application d'informations théoriques et terrains. La subjectivité de l'opératrice dans l'interprétation des informations sur les caractéristiques des différentes classes doit être un facteur à considérer pour l'utilisation de la classification produite dans cet essai dans des projets.

L'interprétation des coefficients de classification obtenus doit être effectuée avec prudence, particulièrement pour la classification de 2011. L'entraînement pour le choix des zones d'entraînement et de validation a été effectué sur la même image Landsat 5-TM qui a été utilisée pour la classification. Ainsi, la précision globale de 99,5 % obtenue ne



reflète probablement pas la réalité. Il aurait été nécessaire d'utiliser des données indépendantes, tel un plus grand nombre de données réalités terrain, afin d'avoir une meilleure source d'information pour la sélection des zones d'entraînement et de validation. Cette observation est aussi applicable au coefficient de classification de 2017, même si la sélection des zones a été effectuée sur les images Sentinel 2-MSI S2A. En effet, la familiarisation avec les caractéristiques spectrales des classes (caractéristiques des composés colorés) pour la sélection des zones a été effectuée sur l'image Landsat 5-TM de la classification de 2011 qui présentent des bandes spectrales équivalentes à celles de Sentinel 2-MSI S2A.

La résolution spatiale pour la classification peut être aussi un limitatif puisque plus les pixels couvrent un grand territoire, plus il y a de la chance qu'ils contiennent plusieurs types de végétations. Cela introduit des erreurs dans la classification qui ne sont pas nécessairement perceptibles lors de l'utilisation d'une matrice de confusion basée sur les pixels, comme c'est le cas dans cet essai. Il serait pertinent d'explorer l'utilisation d'images satellites avec une meilleure résolution spatiale afin de trouver la résolution optimale qui dépend, entre autres, de l'étendue de la zone classifiée, de la complexité des signatures spectrales des différentes classes de végétation ainsi que de la méthode de classification utilisée. (Xie et al., 2008)

### **6.3.2 Application de l'IQH**

Les données topographiques CanVec utilisées pour l'application de l'IQH ne sont pas nécessairement optimales. Par exemple, il n'y a pas de percées répertoriées après les années 1990. Il serait intéressant de savoir si, après cette date, il n'y a plus eu de percées sur le territoire ou si les informations n'ont pas été mises à jour. La combinaison des informations des données topographiques CanVec avec des observations terrains pourrait améliorer la fiabilité des données utilisées pour les variables de l'IQH. Il y a aussi une limite quant à la disponibilité des informations concernant les bandes défrichées et les chemins forestiers puisque les couches vectorielles disponibles datent de 2001.

Une autre limite est que l'IQH a été appliqué sur un territoire occupant une superficie totalisant environ 2 329 km<sup>2</sup>, soit un peu plus que la moitié du territoire recommandé pour l'application de l'IQH qui est de 5 000 à 10 000 km<sup>2</sup>. Le choix du territoire étudié

aurait dû être basé sur l'écologie des caribous occupant la région et respecter le besoin en espace de la population (Leblond et al., 2014b). Toutefois, le choix de la zone étudiée a été effectué pour des études futures afin d'observer la vulnérabilité de la population face au dégel du pergélisol en lien avec la cartographie produite dans Calmels et al. (2014a) et pour évaluer la qualité du territoire de la communauté de Jean Marie River.

Il y a aussi une limite dans l'utilisation des variables liées à l'infrastructure puisqu'il n'y a pas de différenciation entre la nature et l'emprise de l'élément sur le territoire. Par exemple, la route de Mackenzie n'a pas la même emprise ni le même type de surface et possède des accotements plus large que la route d'accès menant à la communauté, mais le poids accordé aux deux routes est le même. Ainsi, il se peut que l'impact des routes dans l'IQH soit plus grand que dans la réalité.

Concernant le calcul de l'IQH, les équations 3, 4 et 5 utilisées pour la distance entre les infrastructures et les cellules ne donnent pas 100 % lorsque la distance maximale de 5000 m est utilisée. Ceci est dû à une imprécision dans les équations polynomiales développées dans Leblond et al., (2014a). La création des équations a été faite à partir de régressions qui ne sont pas optimales. Cette imperfection n'a pas été jugée comme ayant une grande importance par les auteurs puisque, pour l'aire d'application originale de l'IQH, il est rare de se retrouver à plus de 5 km des infrastructures concernées par les équations (Leblond, 2018). Dans le cadre de cet essai, la situation de la zone d'étude est différente puisqu'il y a peu d'infrastructures présentes et il est donc commun d'être situés à plus de 5 km d'infrastructures. Lorsqu'on utilise l'équation avec la distance maximale déterminée de 5000 m pour les mines, on obtient 95,43 %, pour les routes c'est un pourcentage de 104,75 % et pour les chemins on a 87,88 %. Il a été décidé d'utiliser les équations comme telles puisque la modification des équations aurait été trop complexe.

Il est important de souligner que les effets des modifications apportées à l'IQH sont inconnus. L'IQH original avait été validé afin de vérifier si les caribous se retrouvaient plus souvent dans les secteurs évalués comme étant de « bonne qualité » par le modèle (Leblond et al., 2014b). Suite aux modifications effectuées pour adapter le modèle à la région, il serait nécessaire d'effectuer une nouvelle validation avec des données sur le caribou occupant le territoire.

## 6.4 Recommandations

Le travail effectué dans cet essai permet de jeter les bases pour entreprendre des projets liés à l'observation de l'évolution du territoire en lien avec les changements climatiques et ses effets sur le caribou boréal et la végétation. Il est important de poursuivre l'observation des changements du territoire puisque cela permet de développer une meilleure connaissance des enjeux à venir pour le maintien de la sécurité alimentaire de la communauté de Jean Marie River.

Avec les pressions amenées par les changements climatiques, il est important de continuer de surveiller l'évolution de l'occupation de la végétation sur le territoire, surtout avec les changements liés au dégel du pergélisol dans la région. Suite aux classifications effectuées dans cet essai, plusieurs recommandations ont été ciblées pour améliorer le processus de classification pour les travaux futurs. Tout d'abord, il serait pertinent de tester l'ajout de classe pour les nuages et les cours d'eau au lieu d'utiliser un masque afin d'évaluer quelle méthode est la plus efficace. Si une nouvelle comparaison spatiotemporelle est effectuée avec les classifications produites dans ce projet, il est conseillé à l'opérateur d'utiliser comme référence les zones d'entraînement et de validation utilisées dans cet essai afin de bien se familiariser avec les différentes caractéristiques des classes utilisées. Une plus grande quantité de données de vérité terrain prises à des endroits prédéterminés pourrait aussi contribuer à la sélection de zones d'entraînement et de validation. Afin d'augmenter la précision des classifications, l'utilisation d'images satellites avec une meilleure résolution spatiale, soit avec des pixels couvrant un moins grand territoire, pourrait être envisagée. L'introduction d'erreurs dans la classification peut être causée par l'utilisation d'une image satellite avec une résolution spatiale non adaptée. Une analyse de la question devrait être effectuée afin de déterminer la résolution spatiale optimale pour bien différencier les signatures spectrales des différentes classes de végétation selon la méthode de classification utilisée (Xie et al., 2008). En ce qui concerne l'analyse de classification, plusieurs hypothèses ont été apportées, il serait pertinent de cibler des zones précises de changement de classe et d'aller vérifier sur le terrain leur véracité. De plus, une comparaison et analyse de l'évolution du couvert végétal observée avec la carte de la probabilité de présence du

pergélisol et de sa vulnérabilité produite par Calmels et al., (2014a) pourrait être un projet intéressant pour évaluer l'influence du dégel du pergélisol dans la région.

En ce qui concerne l'évaluation de la qualité de l'habitat du caribou boréal dans la région de Jean Marie River, il serait nécessaire d'effectuer une validation de l'IQH utilisé avant de poursuivre avec d'autres analyses puisque plusieurs modifications ont été apportées aux variables d'origine. Il serait important, entre autres, de valider statistiquement la méthode de classification, *Maximum Likelihood*, utilisée. Afin d'évaluer la performance de l'IQH modifié, il serait possible de s'inspirer de la technique utilisée dans Leblond et al., (2014b). L'utilisation de données télémétriques obtenues à partir de colliers GPS sur les caribous dans la région pourrait permettre d'évaluer si l'IQH représente bien l'utilisation de l'espace par la population (Leblond et al., 2014b). Un autre aspect qui pourrait être amélioré dans les projets futurs liés est l'actualité des données utilisées pour les différentes variables de l'IQH. Toutefois, puisqu'il peut être ardu d'acquérir l'information par des levées terrains, les données topographiques CanVec restent un moyen efficace pour l'application de l'IQH à un territoire difficile d'accès. Lorsque l'IQH sera validé, il serait important de le calculer à différentes périodes afin d'évaluer l'évolution de la qualité de l'habitat pour le caribou boréal sur le territoire de Jean Marie River. Cette recommandation est d'autant plus importante lorsqu'on considère les modifications dans le couvert végétal entre 2011 et 2017. Cela permettrait de mieux évaluer comment les variations dans le couvert végétal peuvent influencer la qualité de l'habitat du caribou boréal dans le futur.

## 7 CONCLUSION

L'accomplissement des différents objectifs spécifiques du projet a permis d'acquérir les informations et techniques nécessaires pour l'atteinte de l'objectif général du projet qui était d'évaluer la qualité de l'habitat du caribou boréal dans la région de Jean Marie River. Le but étant de développer une meilleure connaissance de l'habitat de la population du caribou boréal afin de contribuer au maintien et à l'amélioration de la sécurité alimentaire de la communauté de Jean Marie River.

Il a été tout d'abord possible d'analyser l'évolution du couvert végétal de la région étudiée entre 2011 et 2017 en comparant les classifications produites à partir d'images de Landsat 5-TM et de Landsat 8-OLI. La comparaison a permis d'observer l'étendue des zones qui ont été touchées par les feux de forêt ayant eu lieu lorsque la région a subi des conditions de sécheresse entre 2012 et 2015. Plusieurs hypothèses ont pu être apportées afin d'expliquer les différentes variations observées dans le couvert végétal. Les différents stress hydriques entraînés par les changements dans le climat rendent plus vulnérable la végétation face aux insectes et maladies. Le déclin des peupliers faux-trembles dans la région de Dehcho en est un exemple, toutefois il serait nécessaire de confirmer sur le terrain les causes des variations observées entre 2011 et 2017 avant d'émettre une conclusion. En ce qui concerne les variations entre les classes *Tourbière avec mousse* et *Tourbière avec arbuste*, il est à supposer que plusieurs variations sont à venir entre ces deux classes selon l'évolution du climat dans la région surtout en lien avec le dégel du pergélisol.

Afin de pouvoir évaluer la qualité de l'habitat de la zone étudiée, l'IQH de Leblond et al., (2014a) créé pour le caribou boréal dans la province du Québec a été utilisé. Puisque plusieurs données pour les variables composant l'IQH n'étaient pas disponibles pour la zone étudiée, certaines variables ont été adaptées afin d'avoir toutes les informations pour pouvoir appliquer l'IQH au territoire. Un plus grand pourcentage de superficie est retrouvé à l'intérieur de la classe de qualité d'habitat potentiel *Élevée*, mais ces zones sont séparées par des zones avec une moins grande qualité d'habitat principalement lié au passage de la route de Mackenzie et à la route menant à la communauté de Jean Marie River. Cela pourrait être un signe de fragmentation du territoire et être nuisible pour la population du caribou boréal. Les résultats obtenus sont toutefois relatifs à la variabilité d'habitat retrouvée sur la zone d'étude et il serait important d'effectuer une validation de l'IQH modifié avant de l'utiliser comme outil de gestion ou d'analyse de l'évolution de l'habitat du caribou boréal.

Il est recommandé de poursuivre l'observation des changements du territoire de Jean Marie River, surtout avec les variations dans les températures liées aux changements climatiques. Pour les communautés nordiques, comme la communauté de Jean Marie

River, il est important d'être préparé aux différentes modifications de l'environnement entraînées par le déséquilibre météorologique, tel le dégel du pergélisol, qui peuvent avoir une influence sur la faune et la flore, source importante d'aliments pour leur diète traditionnelle. Il est alors important de continuer l'acquisition de données sur l'évolution du territoire pour le caribou boréal qui est considéré comme ayant une forte valeur nutritionnelle, culturelle et écologique pour la communauté. La population est très sensible aux perturbations naturelles et anthropiques de leur habitat et l'utilisation d'un IQH peut être un moyen rapide d'évaluer l'évolution du territoire sur le long terme afin de prendre des décisions pour la protection de la population.

## RÉFÉRENCES

- ACIA (Arctic Climate Impact Assessment) (2004). Impacts of a warming Arctic: Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 139 p.
- AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme) (2012). Climate Issues 2011: Changes in Arctic Snow, Water, Ice and Permafrost. SWIPA 2011, Overview Report, Oslo, Norway, 97 p.
- Anselme, B. et Gadal, S. (2008). Les propriétés optiques des feuilles. UVED. ENVCAL – Suivi de l'environnement par télédétection. [En ligne] <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/vegetation/caracteristique-vegetation/proprietes.html> (Page consultée le 28 avril 2018)
- Arboquebecium (2018). *Picea mariana* – épinette noire. Arboquebecium pépinière, [En ligne] <http://www.arboquebecium.com/fr/arbres-du-quebec/arbres-indigenes/epinette-noire/> (Page consultée le 20 mars 2018)
- Asch, M.I. (2017). Nation Dénée (organisation). Historica Canada, [En ligne] <https://encyclopediecanadienne.ca/fr/article/nation-denee/> (Page consultée le 28 janvier 2018)
- Assembly of First Nations (2007). Traditional Foods: Are they Safe for First Nations Consumption? Assembly of First Nations, Environmental Stewardship Unit, 12 p.
- Books, R.P. (1997). Improving habitat suitability index models. Wildlife Society Bulletin, Vol. 25, No. 1, International Issues and Perspectives in Wildlife Management, p. 163-167.
- Brown, R., Calmels, F., Ireland, M., Laurent, C. et Pivot, F. (2013). Permafrost vulnerability assessment and landscapes changes related to climate change in the Jean Marie River First Nation. University of Alberta, Athabasca University, préparé pour Health Canada et Aboriginal Affairs and Northern Development Canada, 111 p.
- Bull, H. (2017). Littérature review : The effect of permafrost degradation and forest fire prevalence on boreal caribou herd and habitat vulnerability, and community wellbeing in the JMR region. Revue de littérature, Yukon Research Centre, 11 p.
- Calmels, F., Laurent, C. et Ireland M. (2014a). Food security vulnerability assessment related to permafrost degradation in the Jean Marie River First Nation. Yukon College, préparé pour Aboriginal Affairs and Northern Development Canada, 90 p.
- Calmels, F., Laurent, C. et Ireland M. (2014b). Land Cover Map of Jean Marie River – Summary Report. Document méthodologique, 6 p.
- Chasmer, L. and Hopkinson C. (2017). Threshold loss of discontinuous permafrost and landscape evolution. Global Change Biology, No. 23, p. 2672-2686.



- Cheveau, M. et Dussault, C. (2013). Guide d'utilisation des modèles de qualité de l'habitat. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec, Direction générale de l'expertise sur la faune et ses habitats, Gouvernement du Québec, ISBN 978-2-550-69550-9, 25p.
- Conference of Management Authorities (2017). Recovery Strategy for the Boreal Caribou (*Rangifer tarandus caribou*) in the Northwest Territories. Species at Risk (NWT) Act Management Plan and Recovery Strategy Series. Environment and Natural Resources, Government of the Northwest Territories, Yellowknife, 57 p.
- COSEPAC (2011). Unités désignables du caribou (*Rangifer tarandus*) au Canada. Rapport du Comité sur la situation des espèces en péril au Canada, Ottawa, 88 p.
- Côté, M. and Doyon, F. (2004). Spatially explicit habitat suitability model for the woodland caribou (*Rangifer tarandus caribou*) in Western Newfoundland. Report for Institut Québécois d'Aménagement de la Forêt Feuillue, Version 2.0, 30p.
- Crête, M. (2003). Les modèles d'indices de qualité de l'habitat de la faune : des outils utiles pour la gestion de l'exploitation forestière? Société de la faune et des parcs du Québec, Direction du développement de la faune, 25 p.
- Curatolo, J.A. and Murphy, S.M. (1986). The Effects of Pipelines, Roads, and Traffic on the Movements of Caribou, *Rangifer tarandus*. Canadian Field-Naturalist, Vol. 100, N.2, p.218-224.
- Dehcho First Nations (2011). Traditional Knowledge Assessment of Boreal Caribou (Mbedzih) in the Dehcho Region. Prepared for the Canadian Wildlife Service, Fort Simpson, Northwest Territories, 34 p.
- Dene Nation (s.d.). Dene Nation. [En ligne] <http://www.denenation.com/> (Page consultée le 28 janvier 2018)
- Dieye, E.H.B., Diaw, A.T., Sané, T. et Ndour, N. (2013). Dynamique de la mangrove de l'estuaire du Saloum (Sénégal) entre 1972 et 2010. Cybergeog : European Journal of Geography, [En ligne] <https://journals.openedition.org/cybergeog/25671> (Consulté le 6 avril)
- Dussault, C., Courtois, R. et Ouellet, J.-P. (2002). Indice de qualité d'habitat pour l'orignal (*Alces alces*) adapté au sud de la forêt boréale du Québec. Gouvernement du Québec, Société de la faune et des parcs du Québec, Direction de la recherche sur la faune, 44 p.
- Dyer, S.J., O'Neil, J.P., Wasel, S.M. and Boutin S. (2001). Avoidance of industrial development by woodland caribou. Journal of Wildlife Management, Vol. 65, p.531-542.
- Dyer, S.J., O'Neill, J.P., Wasel, S.M. and Boutin S. (2002). Quantifying barrier effects of roads and seismic lines on movements of female woodland caribou in northeastern Alberta. Canadian Journal of Zoology, Vol. 80, p.839-845.

- Environment Canada (2008). Scientific Review for the Identification of Critical Habitat for Woodland Caribou (*Rangifer tarandus caribou*), Boreal Population, in Canada. Environnement Canada, Ottawa, 252 p.
- ESA (2018a). Copernicus Open Access Hub. [En ligne] <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (Page consultée le 10 mars 2018)
- ESA (2018 b). Resolution and Swath. [En ligne] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload/resolution-and-swath> (Page consultée le 10 mars 2018)
- ESA (2018c). Sentinel 2. [En ligne] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (Page consultée le 15 mai 2018)
- Everdingen, R.O. (2005). Multi-Language Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms. Revised Edition. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center
- Gouvernement des Territoire du Nord-Ouest (2014a). Permafrost. NWT State of the Environment Report, [En ligne], <https://www.enr.gov.nt.ca/en/state-environment/13-permafrost> (Page consultée le 4 février 2019)
- Gouvernement des Territoire du Nord-Ouest (2014 b). Trends in thermokarst in the NWT. NWT State of the Environment Report, [En ligne], <https://www.enr.gov.nt.ca/en/state-environment/133-trends-thermokarst-nwt> (Page consultée le 4 février 2019)
- Gouvernement du Canada (2013). Jean Marie River First Nation – Profil de la connectivité. Affaires autochtones et du Nord Canada, [En ligne], <https://www.aadnc-aandc.gc.ca/fra/1357840941968/1360162674989> (Page consultée le 6 janvier 2018)
- Gouvernement du Canada (2018). Fiche d'information – Programme de rétablissement du caribou boréal – Fiche résumé. Registre public des espèces en péril, [En ligne], [http://www.registrelep-sararegistry.gc.ca/document/default\\_f.cfm?documentID=2547](http://www.registrelep-sararegistry.gc.ca/document/default_f.cfm?documentID=2547) (Page consultée le 6 janvier 2018)
- Gouvernement du Québec (2016). Évaluation de la qualité des habitats. Forêts, Faune et Parcs Québec, [En ligne], <http://mffp.gouv.qc.ca/faune/habitats-fauniques/evaluation-qualite.jsp> (Page consultée le 6 janvier 2018)
- Hansen, M.J., Franklin, S.E., Woudsma, C.G. and Peterson, M. (2001). Caribou habitat mapping and fragmentation analysis using Landsat TM, and GIS data in the North Columbia Mountains, British Columbia, Canada. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 77, p.50-65.
- Helbig, M., Wischniewski, K., Kljun, N., Chasmer, L.E., Quinton, W.L., Detto, M. and Sonnentag, O. (2016). Regional atmospheric cooling and wetting effect of permafrost thaw-induced boreal forest loss. *Global Change Biology*, No. 22, p.4048-4066.
- Horne, J.S., Craig, T., Joly, K., Stout, G.W., Cebrian, M.R. and Garton, E.O. (2014). Population characteristics, space use and habitat selection of two non-migratory caribou herds in central Alaska, 1994-2009. *Rangifer*, Vol. 34, No. 1, p. 1-20.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014). Climate Change 2014 : Synthesis Report. Geneva, Switzerland, 151 p.
- Jean Marie River First Nation (s.d.). Jean Marie River First Nation. [En ligne] <http://jmrfn.com/> (Page consultée le 28 janvier 2018)
- Jean Marie First Nation and PACTeam Canada (2011). Impacts to the Health and Wellness of The Jean Marie River First Nation in the Face of a Changing Climate. Final report prepared for Health Canada – Environmental Health Research Division, 73 p.
- Leblond (2018). Communication personnelle. Chercheur scientifique, Direction général des sciences de la technologie, Environnement et Changement climatique Canada, Gouvernement du Canada (mathieu.leblond3@canada.ca)
- Leblond, M., Dussault, C. and St-Laurent, M.-H. (2014a). Development and validation of an expert-based habitat suitability model to support boreal caribou conservation. Biological conservation, No. 177, p.100-108.
- Leblond, M., Dussault, C. et St-Laurent, M.-H. (2014b). Développement et validation d'un modèle de qualité d'habitat pour le caribou forestier *Rangifer tarandus caribou* au Québec. Préparé pour le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Université du Québec à Rimouski, 104 p.
- Lee, P. and Boutin, S. (2006). Persistence and developmental transition of wide seismic lines in the western Boreal Plains of Canada. Journal of Environmental Management, Vol. 78, p.240-250.
- Mallory, C.D. and Boyce, M.S. (2018). Observed and predicted effects of climate change on Arctic caribou and reindeer. Environmental Reviews., Vol. 26, p.13-25.
- Mather, P. and Tso, B. (2016). Classification Methods for Remotely Sensed Data : Edition 2. CRC Press, 2<sup>ème</sup> Édition, 376 p.
- Ministère de l'Exécutif et des Affaires autochtones (s.d.). Premières Nations du Dehcho. Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest, [En ligne] <https://www.eia.gov.nt.ca/fr/directory/premieres-nations-du-dehcho> (Page consultée le 28 janvier 2018)
- Noel, L.E., Butcher, M.K., Cronin, M.A. and Streever, B. (2006). Assessment of effects of an oil pipeline on caribou, *Rangifer tarandus granti*, use of riparian habitats in arctic Alaska, 2001-2003. Canadian Field-Naturalist, Vol. 120, N.3, p.325-330.
- Northwest Territories Centre for Geomatics (2018). Forest Management- Fire History. [En ligne] <http://www.geomatics.gov.nt.ca/Membership/dllist.aspx?i=10> (Page consultée le 21 février 2018)
- Olesinski J. and Brett, R. (2016). 2016 Northwest Territories Forest Health Report. Forest Management Division – Forest Ressources, Government of Northwest Territories, Hay River, 24p.

- Olesinski J. and Brett, R. (2017). 2017 Northwest Territories Forest Health Report. Forest Management Division – Forest Ressources, Government of Northwest Territories, 23p.
- PCI Geomatics (2017). SIGSEP –Signature separability. [En ligne]  
[http://www.pcigeomatics.com/geomatica-help/references/pciFunction\\_r/pytho](http://www.pcigeomatics.com/geomatica-help/references/pciFunction_r/pytho)  
[n/P\\_sigsep.html](http://www.pcigeomatics.com/geomatica-help/references/pciFunction_r/pytho) (Page consultée le 15 mai 2018)
- Peters, J. (2015). The Many Band Combinations of Landsat 8. Harris Geospatial Solutions. [En ligne] <http://www.harrisgeospatial.com/Learn/Blogs/Blog-Details/TabId/2716/ArtMID/10198/ArticleID/15691/The-Many-Band-Combinations-of-Landsat-8.aspx> (Page consultée le 8 avril 2018)
- Ressources Naturelles Canada (2015). Mineuse serpentine du tremble. Arbres, insectes et maladies des forêts du Canada. [En ligne] <https://aimfc.rncan.gc.ca/fr/insectes/fiche/9278>
- Ressources naturelles Canada (2017a). Catalogue CanVec. [En ligne]  
[http://ftp.maps.canada.ca/pub/nrcan\\_rncan/vector/canvec/doc/info.html](http://ftp.maps.canada.ca/pub/nrcan_rncan/vector/canvec/doc/info.html) (Page consultée le 21 février 2018)
- Ressources naturelles Canada (2017 b). CanVec. The Atlas of Canada – Toporama. [En ligne]  
<http://atlas.gc.ca/toporama/en/index.html> (Page consultée le 21 février 2018)
- Species at Risk Committee (2012). Species Status Report for Boreal Caribou (*Rangifer tarandus caribou*) in the Northwest Territories. Species at Risk Committee, Yellowknife, 148 p.
- Statistique Canada (2017). Jean Marie River, Settlement [Census subdivision], Northwest Territories and Region 4, Region [Census division], Northwest Territories. Census Profile, 2016 Census, [En ligne], <http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/dp-pd/prof/details/page.cfm?Lang=E&Geo1=CSD&Code1=6104013&Geo2=CD&Code2=6104&Data=Count&SearchText=jean%20marie%20river&SearchType=Contains&SearchPR=01&B1=All&TABID=1> (Page consultée le 6 janvier 2018)
- Termium Plus (2013). Thermokarst [1 fiche], Gouvernement du Canada, Termium Plus [En ligne] [http://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-fra.html?lang=fra&i=1&srchtxt=THERMOKARST&index=alt&codom2nd\\_wet=1#resultres](http://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-fra.html?lang=fra&i=1&srchtxt=THERMOKARST&index=alt&codom2nd_wet=1#resultres) (Page consultée le 20 mars 2018)
- U.S. Department of the Interior (2018a). Earth Explorer. U.S. Geological Survey. [En ligne]  
<https://earthexplorer.usgs.gov/> (Page consultée le 28 janvier 2018)
- U.S. Department of the Interior (2018 b). What are the band designations for the Landsat satellites? U.S. Geological Survey. [En ligne] <https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites> (Page consultée le 3 avril 2018)
- U.S. Fish and Wildlife Service (1981). Standards for the development of Habitat Suitability Index models. 103 ESM. U.S. Fish and Wildlife Service, Division Ecology Service, n.p.

- Weather Network (2019). Statistics Station Fort Simpson A, Nt, Canada, Weather Network.  
[En ligne] <https://www.theweathernetwork.com/api/sitewrapper/index?b=%2Fstatistics%2F&p=%2Fforecasts%2Fstatistics%2Findex&url=%2Fstatistics%2Fcl2202101%2Fcant0011%2F%2F%2F%3F> (Page consultée le 5 février 2019)
- Weir, J.N., Mahoney, S.P., McLaren, B. and Ferguson, S.H. (2007). Effects of Mine Development on Woodland Caribou *Rangifer Tarandus* Distribution. *Wildlife Biology*, Vol.13, p.66-74.
- Xie, Y., Zongyao, S. and Yu, M. (2008). Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology*, Vol. 1, No.1, p.9-23.
- Zhaojun, B., Joosten, H., Hongkai, L., Gaolin, Z., XingXing, Z., Jinze, M. and Jing, Z. (2011). The response of peatlands to climate warming: A review. *Acta Ecologica Sinica*, Vol. 31, p.157-162.